

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

TOPOGRAFIE POVRCHU PROTLAČOVANÉHO MATERIÁLU

The Surface Topography of Squirting Material

Student:

Bc. Martin SOPUCH

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.

Ostrava 2011

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Sopuch**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **2303T002 Strojírenská technologie**
Téma: **Topografie povrchu protlačovaného materiálu**
The Surface Topography of Squirting Material

Zásady pro vypracování:

1. Přehled současného stavu dané problematiky.
2. Rozbor technologií.
3. Experimentální ověření.
4. Zhodnocení experimentů.
5. Závěr, technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HAVRILA, M.; ZAJAC, J.; BRYCHTA, J.; JURKO, J.; *Top trendy v obrábění, I. část – Obráběné materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 205 s. ISBN 80-968954-2-7.
[2] BUMBÁLEK, B.; ODVODY, V.; OŠTÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. Praha: SNTL, 1989, 340 s. ISBN 04-252-89.
[3] ZAJAC, J.; JURKO, J.; ČEP, R. *Top trendy v obrábění, II. část – Nástrojové materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7.
[4] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
[5] ČSN EN ISO 4288:1997 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – struktura povrchu: Profilová metoda – pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: **Ing. Lenka Čepová, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011





doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě23.5.2011.....

Podpis studenta..........

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 23. 5. 2011


.....
Bc. Martin Sopuch

Na hrázi 422
Příbor
742 58

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

SOPUCH, M. Topografie povrchu protlačovaného materiálu. Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011, 56 stran, 1 příloha.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.

Tato diplomová práce se zabývá měřením a analýzou topografií povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením u protlačovaného materiálu. Jako výchozí materiál byl použit dural EN AW 6060. Pro získání jemnozrnné struktury byl tento materiál protlačován technologií úhlového kanálového protlačování ECAP. Byly zjišťovány změny mechanických vlastností a změny struktury materiálu. Pro obrábění vzniklých vzorků byla použita technologie abrazivního vodního paprsku. Řezné stěny jednotlivých vzorků byly měřeny pomocí optického profilometru MicroProf FRT. Získané data byly vyhodnoceny a výsledky jsou prezentovány na konci diplomové práce.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

SOPUCH, M. The Surface Topography of Squirting Material. Department of Machining and Assembly, Faculty of Mechanical Engineering VŠB - Technical University of Ostrava, 2011, 56 pages, 1 appendixes.

Diploma thesis tutor: doc. Ing. Robert Čep, PhD.

This diploma thesis deals with the measurement and analysis of the surface topography created by hydroabrasive dividing of squirting material. As a source material was used dural EN AW 6060. For creation of fine-grain structure was this material pushed of equal channel angular pressing technology ECAP. Were measured changes in mechanical properties and structural changes of the material. For create samples machining was used abrasive waterjet technology. Cutting walls were measured by a optical profilometer FRT MicroProf. Obtained data were interpretation and results are presented at the close this diploma thesis.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ	- 3 -
1 ÚVOD.....	- 4 -
2 HLINÍK A JEHO SLITINY	- 5 -
2.1 HLINÍK TECHNICKÉ ČISTOTY	- 6 -
2.2 ROZDĚLENÍ SLITIN HLINÍKU.....	- 6 -
2.3 TVÁŘENÉ SLITINY	- 7 -
2.4 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY	- 10 -
2.5 SMĚRY DALŠÍHO VÝVOJE SLITIN HLINÍKU	- 11 -
3 TECHNOLOGIE ECAP.....	- 12 -
3.1 PRINCIP METODY ECAP	- 13 -
4 TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ VODNÍM PAPRSKEM	- 15 -
4.1 KVALITA ŘEZU	- 17 -
4.2 DRUHY ABRAZIVA.....	- 18 -
4.3 VÝHODY A NEVÝHODY.....	- 19 -
5 HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU	- 19 -
5.1 PARAMETRY 2D DRSNOSTI	- 21 -
5.1.1 Výškové (amplitudové) parametry.....	- 21 -
5.1.2 Délkové (šířkové) parametry	- 25 -
5.1.3 Tvarové parametry.....	- 26 -
5.2 MĚŘENÍ 2D DRSNOSTI	- 27 -
5.2.1 Měření pomocí dotykového profilometru	- 27 -
5.2.2 Kontrola porovnání s etalony drsnosti	- 28 -
5.2.3 Metoda světelného řezu.....	- 30 -
5.2.4 Měření s využitím interference světla	- 30 -
5.3 HODNOCENÍ 3D DRSNOSTI	- 32 -
5.4 PARAMETRY 3D DRSNOSTI	- 33 -
5.4.1 Amplitudové parametry	- 33 -
5.4.2 Plošné a objemové parametry	- 34 -
5.4.3 Prostorové parametry	- 34 -
5.4.4 Hybridní parametry	- 35 -
5.4.5 Funkční parametry	- 35 -

5.5	MĚŘENÍ 3D DRSNOSTI	- 36 -
5.5.1	<i>Měření optickým profilometrem</i>	<i>- 36 -</i>
5.5.2	<i>Měření pomocí laserového snímače.....</i>	<i>- 37 -</i>
6	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	- 38 -
6.1	ZKOUMANÝ MATERIÁL	- 38 -
6.2	PŘÍPRAVA VZORKŮ TECHNOLOGIÍ ECAP	- 39 -
6.3	PŘÍPRAVA VZORKŮ TECHNOLOGIÍ AWJ	- 40 -
6.4	METALOGRAFICKÉ VÝBRUSY.....	- 41 -
6.5	MĚŘENÍ TVRDOSTI	- 45 -
6.6	TAHOVÁ ZKOUŠKA.....	- 46 -
6.7	MĚŘENÍ TOPOGRAFIE POVRCHU	- 48 -
7	ZÁVĚR	- 52 -
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	- 54 -
	SEZNAM PŘÍLOH	- 56 -

Seznam použitého značení

Značení	Význam	Jednotka
A	tažnost	%
d_a	průměr usměrňovací trubice	mm
d_o	průměr trysky	mm
E	modul pružnosti	GPa
h	měřená hloubka	mm
F _b	síla při přetržení tyče	N
HB	tvrdost podle Brinella	HB
HV	tvrdost podle Vickerse	HV
L	vzdálenost trysky od povrchu	mm
l_a	délka usměrňovací trubice	mm
l_n	vyhodnocovaná délka	mm
l_r	základní délka	mm
m_a	hmotnostní průtok abraziva	$\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$
P	tlak kapaliny	MPa
R_1, R_2	poloměry zaoblení kanálků	mm
R _a	střední aritmetická úchylka profilu	μm
R _m	mez pevnosti	MPa
R _{p0,2}	mez kluzu	MPa
R _z	největší výška profilu	μm
s(x)	směrodatná odchylka	-
v_p	rychlost posuvu	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$
ρ	hustota	$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
μ	poissonovo číslo	-
σ_c	napětí	MPa
Φ	úhel mezi kanály ECAP	°
Ψ	oblouk zakřivení styku kanálků	°

1 Úvod

Mezi jednu z bouřlivě se rozvíjejících oblastí v současné době patří vývoj nanostrukturních materiálů, většinou z neželezných kovů a jejich slitin, které jsou dobře recyklovatelné a stále více nahrazují ocel. Roste význam jejich použití zejména v automobilovém, leteckém, vojenském a kosmickém průmyslu a to z důvodu snižování nákladů, hmotnosti konstrukcí, zvyšování pevnosti, apod. Mezi takové materiály patří hliník a hlavně jeho slitiny. K přednostem těchto slitin patří např. nízká měrná hmotnost a poměrně vysoká pevnost. U slitin hliníku se dnes však nepředpokládá vývoj zcela nových slitin z hlediska chemického složení, ale spíše ve zlepšování jejich vlastností pomocí změn při výrobě a zpracování.

Velký podíl na dosažení nanostruktury v materiálech mají moderní tvářecí metody, při kterých se díky vysoké plastické deformaci docílí významného rozdrobení zrna v polykrystalických materiálech. Mezi tyto metody patří například rovnostranné úhlové kanálové protlačování (ECAP), krut za vysokého tlaku (HTP) a kumulativní válcování (ARB). Z těchto metod má metoda ECAP veliký potenciál pro výrobu ultrajemné homogenní struktury a zároveň může být tato technologie využita v průmyslové praxi.

S vývojem nových druhů materiálů o vysoké pevnosti a tvrdosti stále rostou požadavky na zvýšení produkce obrábění materiálů. Konvenční metody obrábění nemusí být vždy technicky a ekonomicky výhodné, a často je potřeba využít nekonvenční metody obrábění. Jsou založeny na nejrozličnějších principech obrábění materiálu jako jsou např. elektrické, chemické, mechanické popřípadě jejich kombinace.

Mezi tyto nekonvenční metody patří obrábění vodním vysokorychlostním a vysokotlakým paprskem, který může být buď čistý nebo s přísadou abraziva. Tato metoda umožňuje obrábět intenzivně, ekonomicky a hlavně ekologicky celou škálu průmyslových materiálů.

Cílem této diplomové práce bude posuzování topografie povrchu vytvořeného hydroabrazivním dělením protlačovaného materiálu a posuzování různých vlivů (počet protlačení, velikost zrna, rychlost posuvu řezací hlavy, změna mechanických vlastností, atd.) na výslednou topografii. V diplomové práci se budu zabývat rozbořem

slitin hliníku a jeho současného stavu, popisu principu metody úhlového kanálového protlačování ECAP, popisu technologie obrábění vodním paprskem a rozboru stávajících metod hodnocení topografie povrchu. V experimentální části se kromě vyhodnocování topografie budu zabývat změnami mechanických vlastností a mikrostruktury po jednotlivých protlačeních metodou ECAP. Získané výsledky řešení diplomové práce budou využity v projektu GAČR 101-09-0650.

2 Hliník a jeho slitiny

Hliník a jeho slitiny patří kromě ocelí k nejpoužívanějším konstrukčním kovovým materiálům. Hliník se průmyslově vyrábí od roku 1890, kdy byla jeho produkce 5700 t/rok. Dnes činí světová výroba hliníku přibližně 40 mil. tun a ve světových normách je uvedeno více jak 120 slitin hliníku [1]. Surovinou pro výrobu hliníku je minerál bauxit, ze kterého se poměrně složitým procesem získává oxid hlinitý Al_2O_3 . Z taveniny směsi oxidu hlinitého s kryolitem se elektrolyticky získává kovový hliník. Čistý hliník má kubickou plošně středěnou mřížku. K základním charakteristickým vlastnostem hliníku patří nízká hustota $\rho=2,698 \text{ g.cm}^{-3}$, vysoká elektrická vodivost ($2,65 \text{ } \Omega\text{mm}^2.\text{m}^{-1}$) a nízká teplota tavení $660 \text{ }^\circ\text{C}$ [1]. Hliník může být vysoce čistý od 99,0 do 99,999 % Al. Nečistoty jako Fe, Si, Cu, Mn, Zn a Ti zvyšují pevnost, mají však nepříznivý vliv na plasticitu. S rostoucí čistotou hliníku roste i jeho korozivzdornost, která je způsobena vznikem kompaktní vrstvy oxidů na povrchu.

V roce 1906 vynalezl německý hutní inženýr a chemik Alfred Wilm duralaluminium, velmi lehkou a dostatečně tvrdou slitinu hliníku, mědi a hořčíku (Al-Cu-Mg). Od roku 1910 tuto slitinu pod ochrannou značkou duralumin (neboli dural) začaly v Evropě uvádět na trh německá firma DürerMetallwerke AG, anglická Vickers a francouzská Soc. duDuralumin [2]. V dnešní době běžný dural obsahuje vedle hliníku asi 2,5 - 5,5 % mědi, 0,2 - 1,5 % křemíku, do 1,2 % manganu a 0,2 - 2 % hořčíku, ale také jiné přísady. Díky jeho malé hustotě a odolnosti proti korozi, kterou je možno zvýšit různými povlaky, je od počátku využíván při stavbě lodí, železničních vozů, automobilových motorů a především v leteckém průmyslu. Již v průběhu první světové války zkonstruoval německý průmyslník a průkopník letectví profesor Hugo Junkers

duralové letadlo. Stavba velmi populárních celokovových jednoplošníků se samonosnými křídly byla umožněna až použitím duralu[2].

K přednostem duralu patří zejména nízká měrná hmotnost ($2,47\text{ až }2,89\text{ g.cm}^{-3}$) a poměrně vysoká pevnost ($R_m = 90\text{ až }670\text{ MPa}$), což znamená, že měrné pevnostní charakteristiky jako např. R_m/ρ některých slitin hliníku jsou srovnatelné s obdobnými charakteristikami ocelí, případně jsou lepší [3]. Slitiny hliníku, které neobsahují měď, velmi dobře odolávají korozi v atmosféře a látkám kyselé povahy. Odolnost slitin hliníku proti působení látek alkalických je naopak malá a mohou být také napadeny elektrochemickou korozí, jsou-li ve vodivém styku s ostatními kovy a slitinami s výjimkou zinku a kadmia. Stejně jako čistý hliník se dobře svařují, mají dobrou elektrickou a tepelnou vodivost, jsou vyráběny v širokém sortimentu hutních produktů a vratný odpad se poměrně snadno zpracovává. Nedostatkem slitin hliníku je jejich nízká tvrdost a tedy snadnější poškození povrchu zpracovaného materiálu a výrobků, obtížné třískové obrábění a mechanické leštění měkkých slitin (materiál se maže)[3].

V následujících kapitolách budou popsány vlastnosti a použití technicky čistého hliníku a dále druhy a základní vlastnosti slitin duralu.

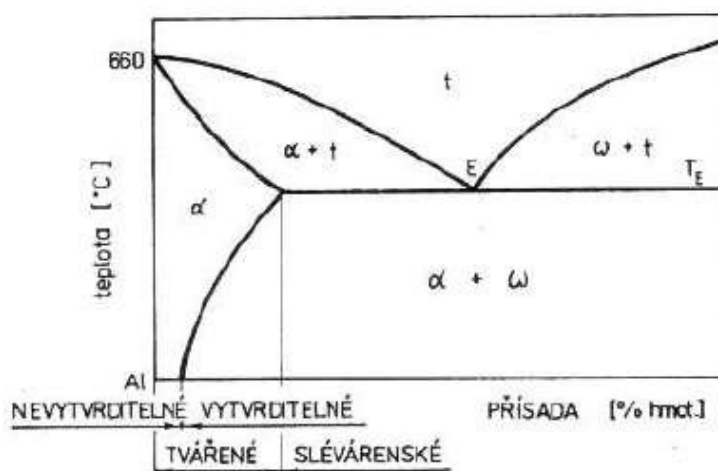
2.1 Hliník technické čistoty

Přibližně 60 % hliníku technické čistoty se zpracovává na plechy. Mezi ostatní hutní výrobky patří tyče a dráty. Pevnost hliníku v tahu je nízká, ve stavu měkkém bývá okolo 70 MPa, ve stavu tvrdém (po tváření za studena) okolo 130 MPa. Čistý hliník je používán zejména jako elektrovodný materiál (Al 99,5 ČSN 42 4004) a materiál pro elektrické kondenzátory. V chemickém a potravinářském průmyslu se uplatňuje pro dobrou tepelnou vodivost a odolnost proti korozi v kyselém prostředí. Používá se na obaly, plátování plechů ze slitin hliníku obsahujících měď, plátování plechů ocelových nebo jako alitovaná povrchová vrstva na výrobcích z ocelí a slitin niklu proti korozi a okujení. [3]

2.2 Rozdělení slitin hliníku

Slitiny hliníku lze dělit podle různých kritérií. Nejčastěji se dělí podle způsobu zpracování, respektované normami ČSN. Jiným kritériem pro dělení slitin může být

jejich schopnost zvýšit tvrdost a pevnost tepelným zpracováním - vytvrzováním. Schopnost vytvrzování souvisí s chemickým složením slitin, tedy jejich polohou v rovnovážném diagramu odpovídající soustavy, a mimo jiné je podmíněna dostatečným přesycením tuhého roztoku na bázi hliníku přísadovými prvky, dosahovaném při rychlém ochlazení slitin z oblasti existence tuhého roztoku α [3]. Ve zjednodušené formě pro binární slitiny je tento způsob klasifikace schematicky vyjádřen na obr.1.



Obr.1 Schéma obecného rovnovážného diagramu binárních slitin hliníku [3]

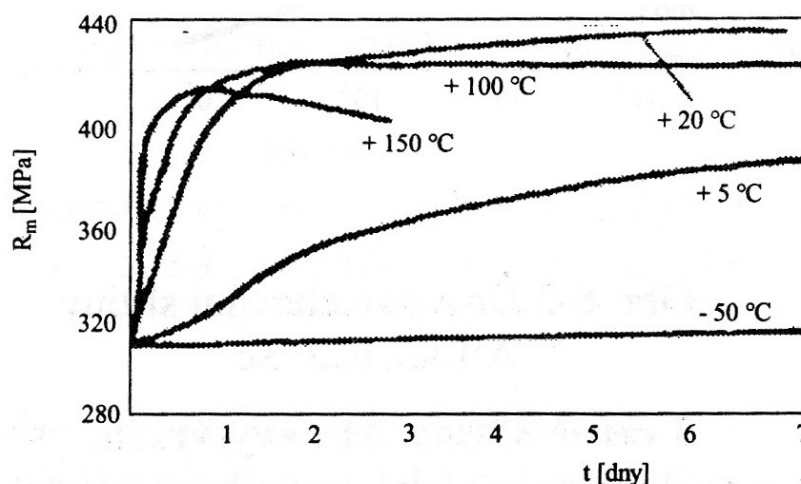
Všechny slitiny hliníku je možno rozdělit do 4 skupin [1]:

- **tvářené slitiny Al** - jsou určeny jako polotovary (desky, válcované profily, trubky) k dalším tvářecím operacím. Tato skupina se dále dělí na slitiny tepelně nezpracovatelné (nevytvrditelné) a slitiny tepelně zpracovatelné (vytvrditelné)
- **slévárenské slitiny Al** - určené pro slévárny. Lze rozdělit podle slitinovýchází na binární siluminy a speciální siluminy.
- **pěnový hliník a jeho slitiny**
- **slitiny Al pro práškovou metalurgii**

2.3 Tvářené slitiny

K nejdůležitější skupině hliníkových slitin patří **vytvrzované slitiny**. Podmínkou vytvrzování je existence rovnovážného diagramu s částečnou rozpustností v tuhém stavu, která se snižující se teplotou klesá. Vytvrzování probíhá ve dvou etapách. V první

etapě je slitina vyžehána na rozpouštěcí teplotu (kolem 500°C), kde dojde k její homogenizaci, poté se slitina prudce ochladí, aby vznikl přesycený tuhý roztok. V druhé etapě probíhá proces stárnutí, buď při teplotě okolí - přirozené nebo častěji při teplotě vyšší (např. 160 °C). Příklad klasické vytvrzovací křivky ukazuje obr.2. Podstatou vytvrzení jsou tzv. Guinier-Prestonovy zóny - neuspořádané a následně uspořádané shluky přesycených atomů fáze Al_2Cu [1].



Obr.2. Efekt teploty stárnutí na pevnost AlCu_4Mg_1 (EN AW-2024) [1]

Vývoj vytvrzovaných slitin šel od Al-Cu-Mg-Mn přes Al-Cu-Mg-Si a Al-Mg-Si k Al-Zn-Mg-Cu. V 70. letech byla navržena slitina Al-Li-Mg, která se stala základem dnes nejperspektivnějších slitin Al-Li-X, kde X znamená Cu, Mg, Zr případně skandium Sc [1]. Tyto slitiny byly v Evropě poprvé použity na Airbus A340, kde bylo použito 500 kg slitiny na letoun. U nové verze Airbusu A380 již je na jeden letoun použito 4000 kg této slitiny. V USA se používají v kosmické technice a vojenském leteckém průmyslu. Nejperspektivnější se dnes jeví slitiny se skandiem, poprvé použité na balistické rakety SSSR, později na bojové letouny např. MIG 29.

V automobilovém průmyslu se hliníkové slitiny dostávají do popředí zájmu z důvodu snadné recyklovatelnosti a snížení hmotnosti automobilu až o 40%. Použití vytvrditelných slitin bylo zpočátku odmítáno vzhledem k nižší korozní odolnosti a obtížnější svařitelnosti. Dnes tyto problémy odpadly díky zavedení moderních progresivních metod svařování (např. laserové svařování, frakční svařování), které umožňují snížit pnutí a deformace ve svarech a moderních procesů lakování,

kteřé je možno kombinovat s umělým stárnutím těchto slitin. Použití slitin Al-Li-X je u komerčních automobilů v počátcích, protože jsou přibližně 4x dražší než konvenční slitiny.

V tabulce 1 jsou uvedeny charakteristické a často používané slitiny výše popsaných skupin.

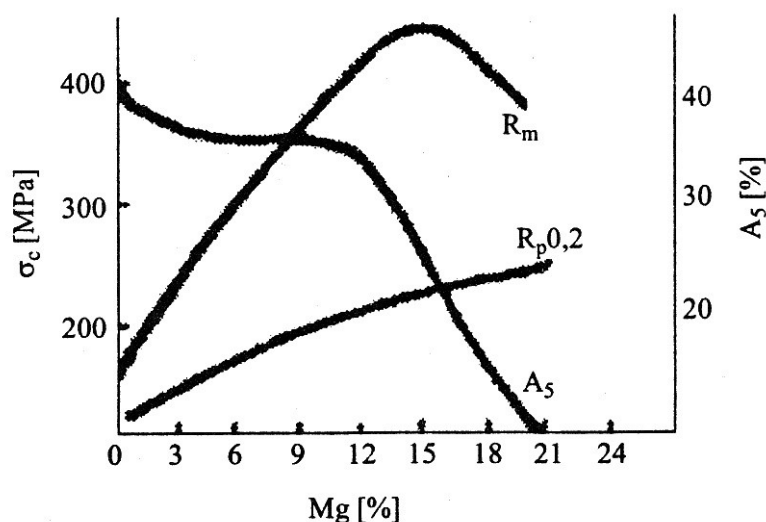
Tab.1 Nejčastěji používané slitiny Al[1]

Slitina	Označení	R _m [MPa]	A5 [%]	Použití, vlastnosti
AlCu4Mg1	EN AW-2024	480	11	Všeobecné strojírenství, zhoršená svařitelnost
AlMg1SiCu	EN AW-6061	220	22	Stavebnictví, elektr., dobrá zpracovatelnost
AlZn6MgCu	EN AW-7050	560	8	Doprava, letectví, nebezpečí koroze
AlZn7CuMg	EN AW-7060	590	7	Doprava, letectví, nebezpečí koroze
AlCu2Mg1,5Ni	EN AW-2618A	430	13	Automobily, do 250 °C
AlLi2Cu2ZrSc	GOST 1460	650	8	Letectví, aeronautika, dobrá svařitelnost
AlLi2,5Cu1,5Mg1	EN AW-8090	640	8	Letectví, aeronautika, dobrá svařitelnost

Nevytvrzené slitiny Al jsou především slitiny Al-Mn nebo Al-Mg. Zpevnění první skupiny je nízké, způsobené jen tuhým roztokem Mn v Al, proto se někdy přidává Cu.

Slitiny AlMn1 nebo AlMn1Cu jsou díky vynikající tvařitelnosti, svařitelnosti a korozivzdornosti nejrozšířenějším materiálem v automobilovém průmyslu, především na trubky, chladiče, topení atd. Nevelkou pevnost slitin AlMn1 ($R_m=130-150$ MPa) lze zvýšit deformačním zpevněním, tedy tvářením za studena na $R_{mmax}=220$ MPa. Jsou často použity jako pevnější náhrada čistého hliníku.

Typ Al-Mg je dvoufázový ($\alpha+\beta$) a z obr.3 je patrné, jak rostoucí obsah Mg zvyšuje pevnostní úroveň [1]. Slitiny Al-Mg tvoří řadu AlMg2, AlMg3, AlMg5, a AlMg6. Slitiny s obsahem hořčíku větším než 6 hm.% mají sklon ke korozi po hranicích zrn, proto se obvykle nepoužívají [3]. Nevelkou pevnost lze opět zvýšit deformačním zpevněním do $R_{mmax}=420$ MPa, které se používá především pro slitinu AlMg5, a to se stupněm deformace 20 až 30%. Při větších deformacích značně klesá tvárnost a korozivzdornost.

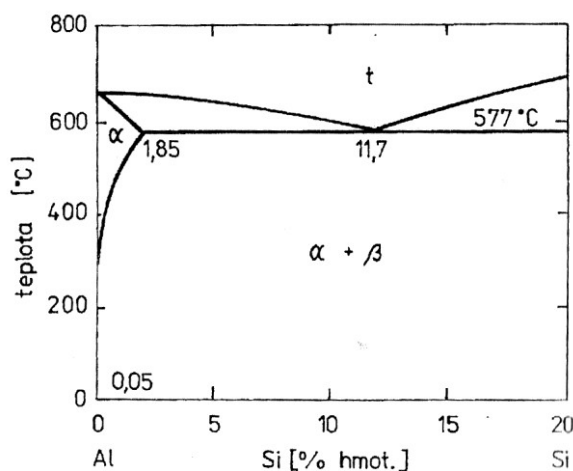


Obr.3 Vliv obsahu Mg na mechanické vlastnosti slitin AlMg

2.4 Slévárenské slitiny

Jsou určeny k výrobě tvarových odlitků litím do písku, do kovových forem nebo tlakově. Mechanické hodnoty odlitků nedosahují hodnot výrobků tvářených ($R_{mmax}=250\text{MPa}$) a značně závisí na způsobu odlévání. Hrubá struktura s nejnižšími pevnostními charakteristikami vzniká při lití do písku, jemná struktura s lepšími vlastnostmi se tvoří při lití do kovových forem nebo při lití tlakovém[3]. Slitiny hliníku pro odlitky lze rozdělit podle slitinových bází na binární siluminy a speciální siluminy.

Binární (jednoduché) **siluminy** jsou slitiny Al-Si (obr.4), které se dělí na podeutektické, eutektické a nadeutektické. Nejlepší slévárenské vlastnosti mají eutektické siluminy. Eutektikum v binárních siluminech představuje směs tuhého roztoku α a krystalů téměř čistého křemíku β . K přednostem siluminů Al-Si patří dobrá odolnost proti korozi. Přesto se pro tvarové odlitky používají zřídka a nejvíce se osvědčily jako hliníkové pájky.



Obr.4 Soustava Al-Si

Speciální siluminy jsou pevnější a proto častěji používané slitiny k odlévání. Nejlepší vliv na zlepšení pevnostních charakteristik binárních siluminů mají přísady Mg a Cu, které umožňují takto vznikající speciální siluminy Al-Si-Mg a Al-Si-Cu vytvrzovat [3]. Tyto slitiny lze pak dlouhodobě mechanicky zatěžovat až do teplot 275°C. Slévárenské vlastnosti speciálních siluminů jsou horší než binárních siluminů. Ke zlepšení některých vlastností se mohou přidávat do speciálních siluminů další přísady jako např. Mn, Ti, Zn, Ni, V, B. Ze speciálních siluminů jsou odlévány tvarově složité a tenkostěnné odlitky všeho druhu včetně velkorozměrných, např. skříně spalovacích motorů a převodovek, písty a hlavy válců, řemenice, pouzdra, disky kol, součásti pro letadla [3].

2.5 Směry dalšího vývoje slitin hliníku

Největší pozornost je dnes věnována vývoji slitin Al-Li-X se snahou o zvýšení jejich houževnatosti, odolnosti proti korozi a zvyšování teplotní odolnosti. Dále se vyvíjí intermetalika na bázi aluminidů Ti_3Al , které mají vysokou rezistenci proti oxidaci do teplot okolo 1100°C [1].

U slitiny hliníku se dnes však nepředpokládá vývoj zcela nových slitin z hlediska chemického složení, ale spíše ve zlepšování jejich vlastností, pomocí změn při výrobě a zpracování. Lze očekávat rozvoj zpracování slitin hliníku v prášku s následujícím tvářením izotermickým, izostatickým a v superplastickém stavu, a spojování difúzí, laserem a elektronovým paprskem [3].

Pozornost je třeba věnovat také tepelnému zpracování. Dosavadní postupy považované za optimální byly většinou takové, které přinášely maximálně možné pevnostní charakteristiky slitin. Praxe však ukázala, že u mnoha součástí statická pevnost není pro jejich bezpečnou dlouhodobou funkci rozhodující. Nové postupy tepelného zpracování by tedy měly sledovat možnosti zvýšené lomové houževnatosti slitin, tvárnosti, odolnosti proti korozi či snížení vrubové citlivosti. Zvyšování pevnosti je však možné jen na úkor jiných, neméně důležitých vlastností. [3]

3 Technologie ECAP

S rostoucí spotřebou materiálů a stále se zvyšujícími se nároky, kladenými na jejich hospodárné využití je stále důležitějším aspektem podrobné studium jejich vlastností. Aby bylo možno dosahovat bezpečného a spolehlivého provozu vyrobených konstrukcí a současně trvale docilovat snižování jejich hmotnosti a tím i materiálových úspor, je nutno nejen využívat nových materiálů s lepšími vlastnostmi, ale i lépe využívat vlastnosti stávajících materiálů [5]. K tomu je potřeba důkladných znalostí materiálových a strukturních charakteristik, ale také znalost jejich namáhání v provozních podmínkách apod. S tím bezprostředně souvisí zavádění nových technologií výroby materiálů a následného zpracování, ať už jde o nové technologie tepelného zpracování, tváření apod.

Jednou z bouřlivě se rozvíjejících oblastí je i vývoj nanostrukturních materiálů, který patří v současné době k prioritním oblastem vědeckého výzkumu v oblasti materiálů i tvářecích technologií ve světě [5]. Jedná se především o tváření neželezných kovů a jejich slitin. Ty jsou velmi dobře recyklovatelné a nahrazují stále ve větším měřítku oceli. Zároveň u výrobků z těchto materiálů dochází k významnému snižování výrobních nákladů. Roste význam jejich použití zejména v automobilovém průmyslu, leteckém, vojenském a kosmickém průmyslu. Významné světové automobilky jako např. Opel, Audi, Jaguar, Ford, Fiat, Volvo, Toyota vyvíjí zcela nové koncepce malolitražních automobilů s vysokým podílem hliníku a jeho slitin. Jako výchozí polotovary jsou používány slitiny hliníku s ultrajemnozrnou strukturou, jejíž vývoj je uskutečňován pomocí technologií pro dosažení nanostrukturních materiálů. Dosažení ultrajemnozrné struktury u výchozího materiálu vede

k podstatnému zvýšení plasticity a umožňuje tvářet materiály v podmínkách „superplastického stavu“[5].

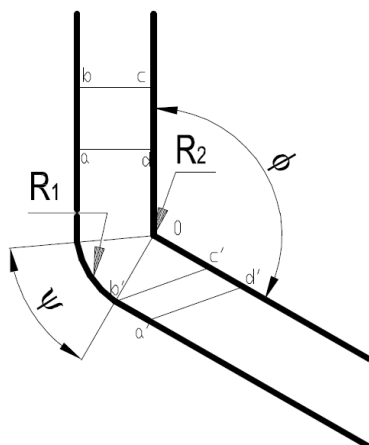
Značně velký podíl na dosažení nanostruktury v materiálech mají moderní tvářecí metody, při kterých pomocí vysoké plastické deformace docílujeme významného rozdrobení zrna v polykrystalických materiálech. V současné době napěťové procesy zahrnují protlačování pod úhlem (ECAP), vysokotlaký krut (HTP) a nahromaděné válcové zpevnění (ARB) [4]. Z těchto procesu je metoda ECAP výjimečná, protože má potenciál pro výrobu ultrajemné homogenní struktury a zároveň může být tato technologie úspěšně využita v průmyslové praxi.

3.1 Princip metody ECAP

ECAP-Equal-Channel Angular Pressing (Protlačování rovnostranným pravoúhlým kanálem) umožňuje získat ultrajemné zrno ve větších objemech, kdy se při vlastním protlačování nezmenšuje výchozí příčný průřez. Tím se tento proces odlišuje od většiny obvyklých způsobů tváření kovů jako je válcování nebo protlačování, kde je průvodním jevem zmenšení rozměrů příčného průřezu opracovávaného materiálu a deformace je docílena změnou výchozího průřezu.

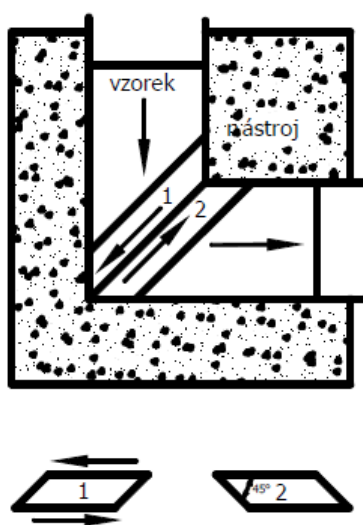
Podstata metody ECAP spočívá v protlačování buď válcového nebo hranolovitého vzorku kanálem s definovanou geometrií. Hlavní význam pro proces ECAP má úhel propojení vertikálního a horizontálního kanálu Φ , který se většinou volí 90° – 135° a významná je i závislost na úhlu $\Psi=20^\circ$ – 90° oblouku zakřivení v místě, kde se oba kanálky protínají (obr.5). Dalším důležitým parametrem ovlivňujícím dosaženou velikost deformace jsou poloměry zaoblení kanálu R_1 a R_2 . Pro velmi dobře, dobře a obtížně tvářitelné materiály se musí velikost těchto poloměrů zaoblení stanovit individuálně pro skupinu materiálu s navzájem podobným chemickým složením a mechanickými vlastnostmi [6].

Použití nástroje s různou velikostí úhlu Φ ovlivňuje heterogenitu struktury ve vzorku. Pro dosažení větší deformace v protlačovaném vzorku se prokázalo použití úhlu zakřivení kanálu nástroje $\Phi=90^\circ$ při úhlu zaoblení kanálu nástroje $\Psi=28^\circ$ [6].



Obr.5 Geometrie kanálu ECAP [6]

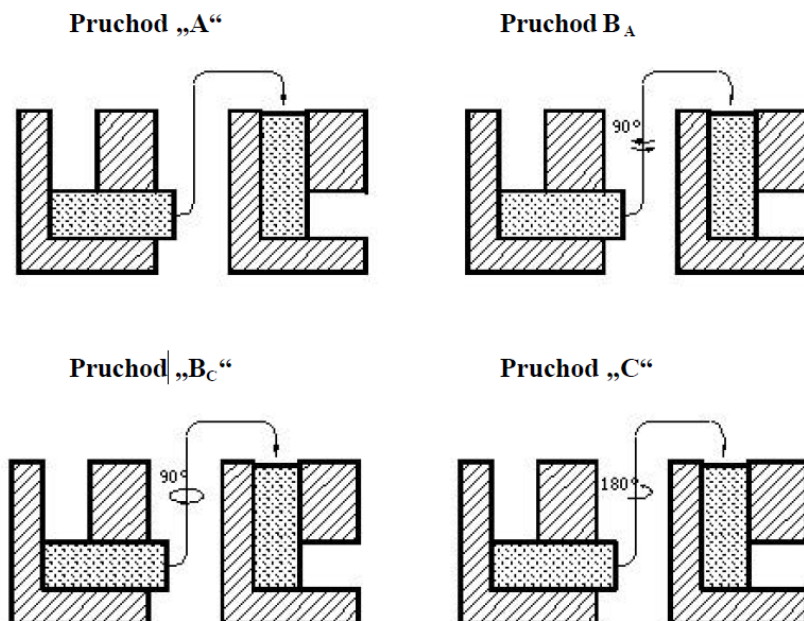
Nejčastěji je opracovaný vzorek vložen do matrice tvaru písmene L, kdy je úhel mezi dvěma částmi zápusťky roven $\Phi=90^\circ$ a testovací vzorek je namáhán na stříh v okamžiku přechodu z jedné části do druhé jak je znázorněno na obr.6.



Obr.6 Princip průchodu přes nástroj ECAP[5]

Jelikož je plocha příčného průřezu vzorku neměnná na jednotlivých místech při průchodu kanálem, je zřejmé, že může být prováděno opakované protlačování za účelem dosažení velmi vysokého stupně deformace (vícenásobná plastická deformace). V praxi je možné otočit vzorek mezi jednotlivými protlačováními, takže je aktivován odlišný stříhový systém. Několik výzkumných prací bylo zaměřeno na vyhodnocení efektu otáčení vzorku mezi jednotlivými průchody [5]. Nyní jsou

obecně známé čtyři odlišné průchody kanálem, které jsou popsány jako průchod typu A, typu B_A, typu B_C a typu C a jsou schematicky uvedeny na obr.7 [5].



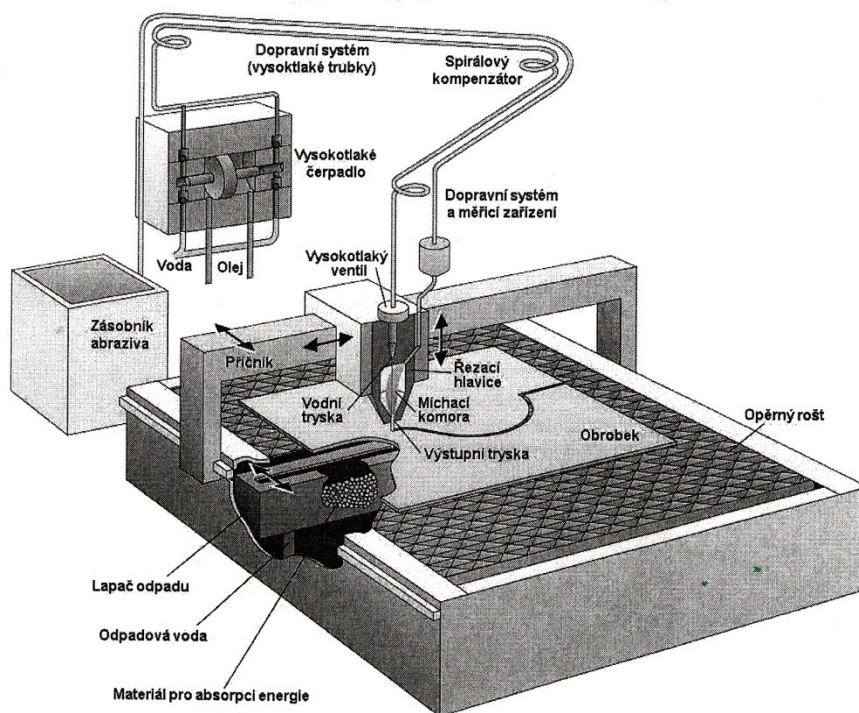
Obr.7 Schéma jednotlivých typu průchodů nástrojem ECAP [5]

4 Technologie obrábění vodním paprskem

Tato technologie patří mezi nekonvenční technologie obrábění, která má širokou škálu použití jako např. řezání, otryskávání, drážkování, odstraňování otřepů, vrtání, gravírování apod. Tato metoda má technologicky a ekonomicky vhodné aplikace např.[15]:

- řezání hliníku, duralu, mědi, mosazi, bronzu apod. na čisto, v případě větších tloušťek hrubování,
- čisté řezání ocelí (konstrukční a hlavně nerezových) v tloušťkách nad možnosti laseru,
- řezání hrubých polotovarů z ocelí pro následné opracování,
- řezání materiálů určených k tepelné úpravě - zušlechtění nebo po tepelné úpravě, které pak nejsou řezem ovlivněny,
- řezání těžkoobrobitelných ocelí - nástrojových, kalených, abrazi odolných (hardox, abrazit, altrix, apod),
- řezání sklolaminátů, gumotextilů, pryží, plastů, apod.,
- řezání skla (kromě kaleného), mramoru, dlažby, obklady, atd.

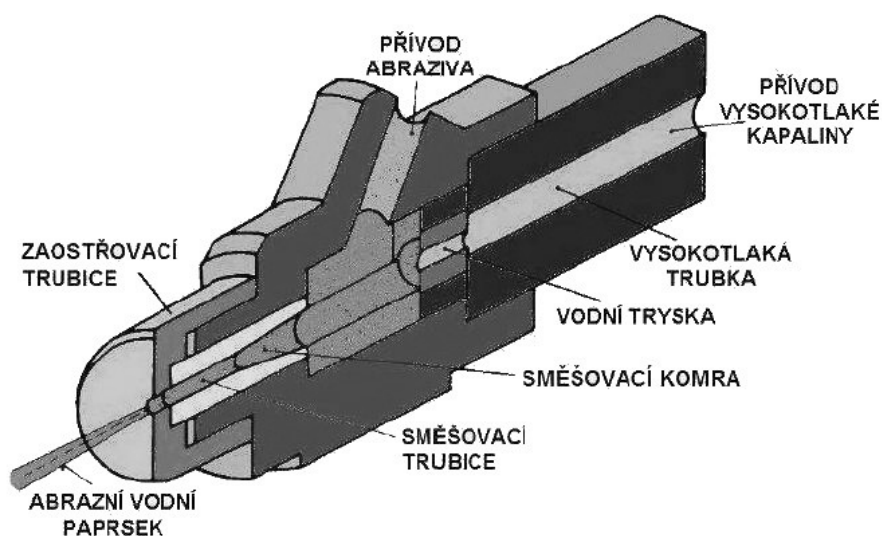
Princip metody spočívá v oddělování materiálu kinetickou energií vysokotlakého a vysokorychlostního vodního paprsku, který může být buď čistý WJM (Water Jet Machining) nebo kombinovaný s abrazivem AWJM (Abrasive Water Jet Machining). Schéma této technologie pro řezání je znázorněno na obr.8. [15]



Obr.8 Schéma řezání vodním paprskem [15]

Z konstrukčního hlediska dýzy se rozlišují dvě hlavní technologie abrazivního paprsku [15]:

- Systém s přímým přívodem brusiva AWJ - brusivo je přivedeno ze zásobníku do směšovací komory, ve které je vysokotlakým vodním paprskem strháváno a urychlováno. Tlak vody je 7 až 700 MPa a průtok abraziva 1 až 20 Kg.min⁻¹. Tato tryska je zobrazena na obr.9.
- Systém s přímým vstřikováním brusiva ASJ - do dýzy se přivádí stlačená suspenze smíšená s vodou v tlakové nádobě. Tlak bývá do 100 MPa a průtok suspenze okolo 20 Kg.min⁻¹. ASJ systém má větší účinnost a vyšší proudovou hustotu narážejících částic než AWJ a umožňuje použití užšího průměru paprsku.



Obr.9 Řezací hlavice pro AWJ [15]

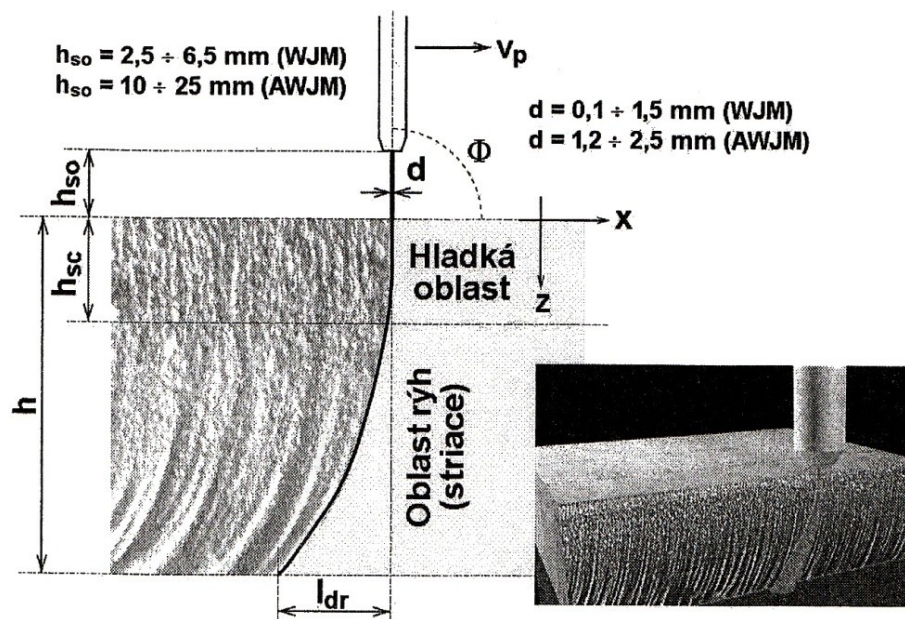
4.1 Kvalita řezu

Na kvalitu řezu má vliv velké množství vstupních parametrů jako např.:

- výtokový průměr trysky
- tlak a rychlost paprsku
- vzdálenost ústí trysky od povrchu obrobku
- úhel sklonu paprsku
- druh abraziva a aditiva
- druh obráběného materiálu

Přesnost se pohybuje $\pm 0,1$ mm u tenkých obrobků (do tloušťky asi 100 mm), $\pm 0,2$ mm u standardních tloušťek a může být až ± 1 mm u velkých tloušťek většinou v rádiusových přechodech.

Drsnost se udává v rozmezí $R_a = 2,5$ až $12 \mu\text{m}$. Drsnost řezané plochy se podél tloušťky řezaného materiálu mění (asi od jedné třetiny) a nejhorší drsnost je na straně výstupu paprsku. To je zapříčiněno vlastním procesem řezání, kde ve větších hloubkách řezu dochází ke ztrátě kinetické energie paprsku a paprsek se začne vychylovat. Tento proces je zobrazen na obr.10.



Obr.10 Vlastní proces řezání [15]

4.2 Druhy abraziva

Druh, zrnitost, tvrdost, tvar zrn, hmotnostní tok a ekologičnost patří mezi nejdůležitější faktory, mezi kterými se rozhodujeme při volbě technologicky správného, ekologického a ekonomicky výhodného druhu abraziva. Výběr vhodného abraziva je důležitý i z důvodu, že náklady na abraziva představují největší položku při řezání AWJ. Mezi základní používaná abraziva patří např. [15, 16]:

- Granát ($5\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{Y}_2\text{O}_3$) - nejčastěji používaný, vyšší cena, vysoký účinek, více opotřebovává trysku, není příliš vhodný pro recyklaci
- Oxid hlinitý - Al_2O_3
- Křemičitý písek - nízká cena, nižší účinek a opotřebení trysky, špatná recyklace
- Olivín
- Ocelová drť nebo broky
- Karbid bóru - B_4C
- Kubický nitrid bóru - BN

4.3 Výhody a nevýhody

Mezi výhody patří vysoká energetická účinnost (až 80%), studený řez, obrobené hrany nemají tepelnou ani mechanickou deformaci, nejsou zbytková napětí a deformace, bezprašný proces, malé ztráty materiálu v důsledku tenkého řezu, jedno vysokotlaké čerpadlo může napájet i více trysek současně, spolehlivost a jednoduchost obsluhy, přesné čištění a leštění povrchu těžkoobrobitelných materiálu, šetrnost k životnímu prostředí, apod.

Mezi nevýhody patří např., že řezaný materiál musí snášet kontakt s vodou, zaoblení vnitřních rohů (dáno průměrem paprsku), nelze řezat kalené sklo nebo hrnčířskou hlinu v neopracovaném stavu, pořizovací náklady, apod. [15]

5 Hodnocení drsnosti povrchu

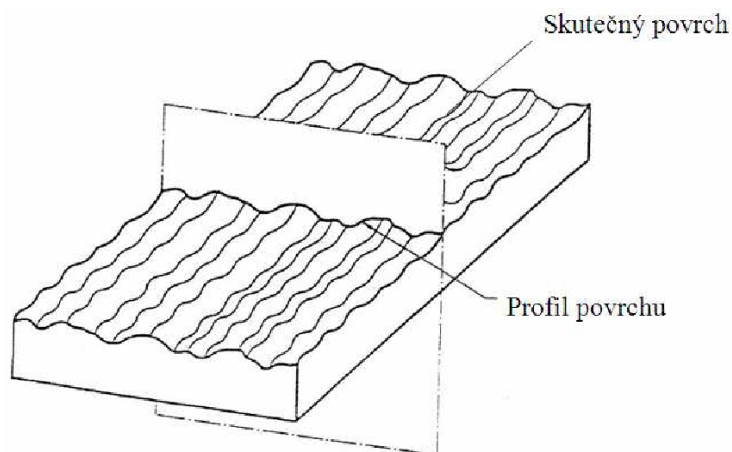
Žádný povrch není geometricky dokonale rovinný a vždy obsahuje určité odchylky. Tyto odchylky vznikají při přípravě povrchů a jsou důsledkem působení vnějších sil nebo prostředí. Rozlišují se 4 druhy nerovností [7]:

- **mimořádné nerovnosti** (makronerovnosti) - jde o trhliny, náhodné nerovnosti na odlitcích a výkovicích, nepravidelné rýhy, apod.,
- **vlnitost povrchu** - jde o periodicky se opakující nerovnosti, které většinou vznikají při obrábění chvěním stroje, nástroje a obráběné součásti,
- **drsnot povrchu** (mikronerovnost) - pravidelně se opakuje a je podmíněna technologickým pochodem,
- **ultramikronerovnosti** - superponují se na mikronerovnosti a jsou dány snahou dosáhnout nejstabilnějšího stavu krystalického povrchu.

Drsnost povrchu (mikronerovnost), je podmíněna technologickým pochodem a pravidelně se opakuje. Problém posuzování nerovností se řeší redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu. V rovině řezu se získá profil, který je základním zdrojem informace pro posuzování drsnosti (obr.11). Dosud se v technické praxi běžně používá

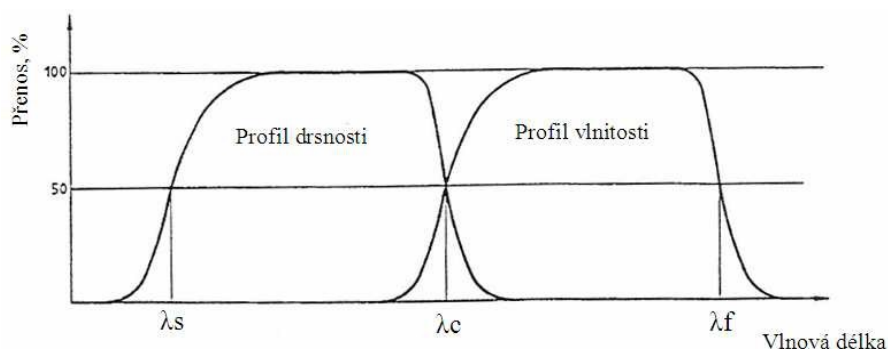
k jejich hodnocení zjednodušená (normalizovaná) metoda využívající profil nerovností vzniklý v rovině řezu (2D) stanovený normami [10]:

- ČSN EN ISO 4287: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu
- ČSN EN ISO 4288: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu



Obr.11 Profil povrchu [10]

Při hodnocení sejmutého profilu formou číselných hodnot parametrů povrchu se uplatňují základny tvořené použitým typem filtru, který slouží k oddělení frekvenčních složek nerovností profilu. Jedná se o složky signálu různých vlnových délek příslušející základnímu profilu, vlnitosti povrchu a drsnosti povrchu (obr.12).[10]



Obr.12 Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [10]

Filtr profilu rozděluje na dlouhovlnné a krátkovlnné složky [10]:

- filtr profilu λ_s – filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu,
- filtr profilu λ_c – filtr definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti,
- filtr profilu λ_f – filtr definující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu.

Norma ČSN EN ISO 4287 definuje tyto geometrické parametry:

- **Základní profil** (P profil – *primary profile*) – profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny,
- **profil drsnosti** (R profil – *roughness profile*) – profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru profilu λ_c ,
- **profil vlnitosti** (W profil – *waviness profile*) – profil odvozený postupnou aplikací filtru profilu λ_f a filtru profilu λ_c na základní profil, potlačující dlouhovlnné složky filtrem profilu λ_f a krátkovlnné složky filtrem profilu λ_c .

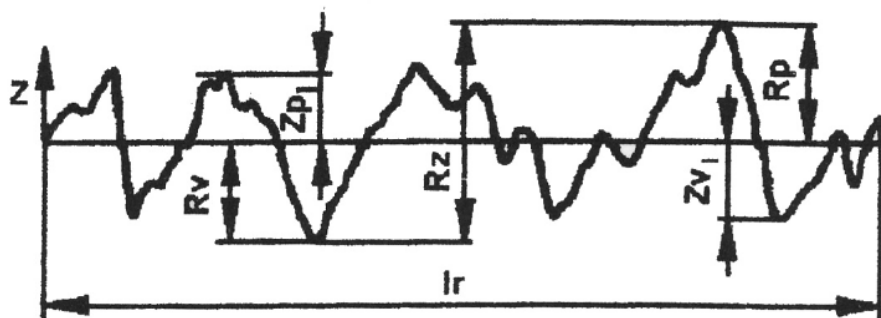
Mezi další základní pojmy, které by se měly uvést patří základní délka l_r a vyhodnocovaná délka l_n . **Základní délka l_r** je délka ve směru osy X používána pro rozpoznání nerovností charakterizujících daný profil. Základní délka pro drsnost l_r je číselně rovna hodnotě filtru λ_c . **Vyhodnocovaná délka l_n** je délka ve směru osy X používána pro posouzení vyhodnocovaného profilu, může obsahovat jednu a více základních délek. [8]

5.1 Parametry 2D drsnosti

5.1.1 Výškové (amplitudové) parametry

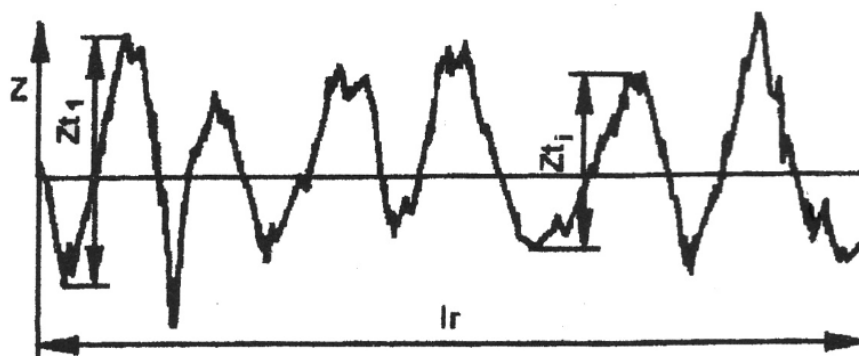
- **Největší výška výstupku profilu R_p** - výška Z_p největšího výstupku profilu v rozsahu základní délky l_r (obr.13).[8]
- **Největší hloubka prohlubně profilu R_v** - hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l_r (obr.13).[8]

- **Největší výška profilu R_z** - součet největšího výstupku Z_p a nejnižší prohlubně Z_v v rozsahu základní délky l_r (obr.13). Tento parametr je často používaný pro svou spolehlivou a vypovídající schopnost.[8]



Obr.13 Parametry R_p , R_v , R_z [8]

- **Průměrná výška profilu R_c** - průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu v rozsahu základní délky l_r . Měření R_c vyžaduje zadání jedné vertikální a horizontální hladiny řezu(obr.14). Vztah pro výpočet udává rovnice 1. Tato hodnota má větší vypovídající schopnost než R_a . Používá se při vyhodnocování povrchů při pokovování, analýze netěsnosti povrchů a zadržování maziva v prohlubinách. Vhodné použít v kombinaci s R_z . [8,9]

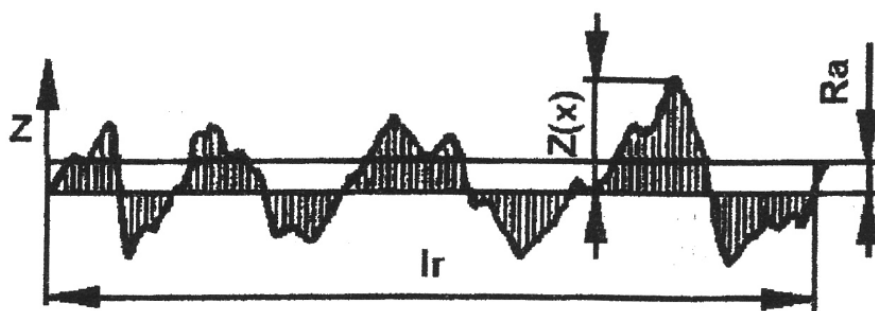


Obr.14 Parametr R_c [8]

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{t_i} \quad (1) \quad [17]$$

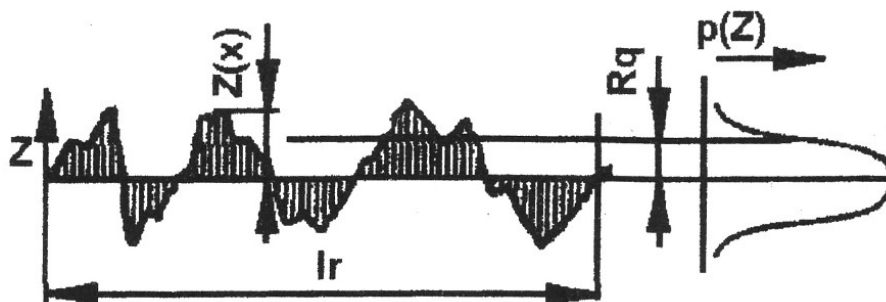
- **Celková výška profilu R_t** - součet nejvyššího výstupku Z_p a nejnižší prohlubně Z_v v rozsahu vyhodnocované délky l_n . [8]

- **Střední aritmetická úchylka profilu R_a** - aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r (obr.15). Vztah pro výpočet udává rovnice 2. Vypovídající schopnost tohoto parametru je nízká, nereaguje citlivě na extrémní výšky hrotů profilu a hloubky rýh profilu. R_a je klamavý, protože i rozdílné povrchy mohou mít stejnou hodnotu a funkce povrchu se liší. Navzdory nedostatkům, může být tento způsob používán jako spolehlivý kontrolní parametr při zavedené výrobě, kde sledujeme případnou změnu drsnosti povrchu. [8,9]

Obr.15 Parametr R_a [8]

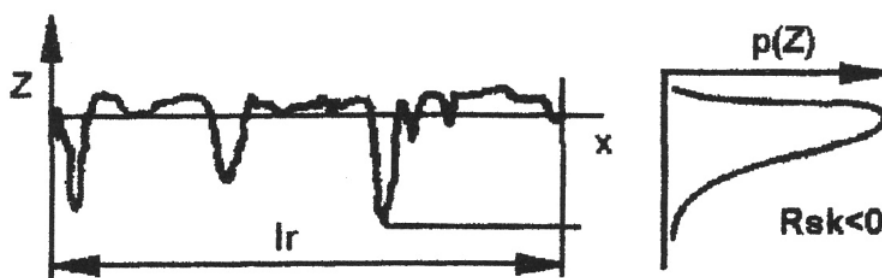
$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (2) \quad [17]$$

- **Průměrná kvadratická úchylka profilu R_q** - průměrná kvadratická hodnota pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r (obr.16). Vztah pro výpočet udává rovnice 3. Parametr R_q má význam při statistickém pozorování profilu povrchu, neboť zároveň odpovídá standardní odchylce z profilových souřadnic. Je efektivnější parametr než R_a . R_q parametr je využíván v optice, v průmyslu pro specifikování povrchu při konečných úpravách povrchu nátěrem, pokovováním apod. [8,9]

Obr.16 Parametr R_q [8]

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^2(x) dx} \quad (3) \quad [17]$$

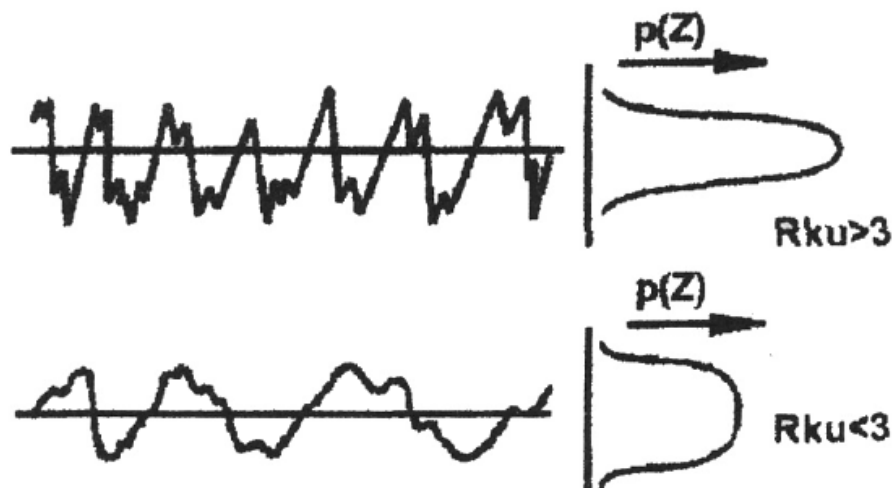
- **Šikmost posuzovaného profilu** (součinitel asymetrie-skewness) **Rsk** - podíl průměrných hodnot třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty Rq v rozsahu základní délky lr (obr.17). Vztah pro výpočet udává rovnice 4. Negativní hodnota Rsk odpovídá dobrým vlastnostem nosnosti profilu. Nevýhodou je, že velmi vysoký výstupek, popř. prohlubina skresluje tento parametr a ovlivňuje výpočet hlavně při třetí mocnině Rq ve vzorci. Rsk se využívá v různých oborech při hodnocení měrné vodivosti nebo udržování maziva ve struktuře povrchu. I přes jeho nedostatky poskytuje dostatečně spolehlivé a statisticky významné hodnoty. [8,9]



Obr.17 Parametr Rsk [8]

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^3(x) dx \right] \quad (4) \quad [17]$$

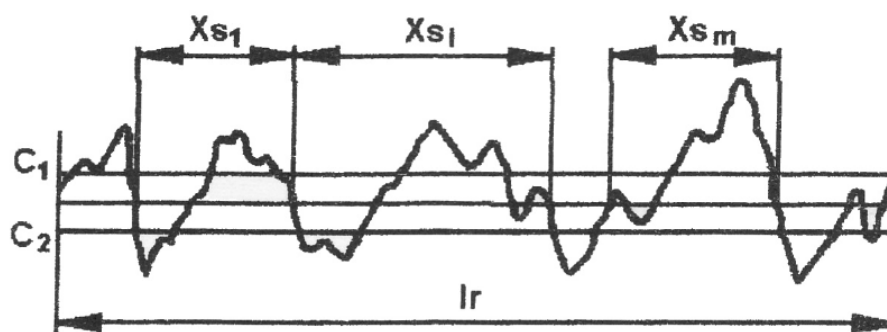
- **Špičatost posuzovaného profilu Rku** - podíl průměrných hodnot čtvrtých mocnin pořadnic $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty Rq v rozsahu základní délky lr . Při normálním rozdělení souřadnic profilu $Rku=3$, ostřejší výstupky a rýhy $Rku>3$ a naopak (obr.18). Vztah pro výpočet udává rovnice 5. Nedostatkem Rku je, že při Gaussovém rozdělení se nesmí vyskytnout extrémní výstupky nebo prohlubiny. Použití Rku je podobné jako Rsk a pro jeho hodnověrnost musí být vyhodnocována dostatečná délka pro poskytnutí statisticky významných hodnot. [8,9]

Obr.18 Parametr Rku [8]

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z_{\omega}^4 dx \right] \quad (5) \quad [17]$$

5.1.2 Délkové (šířkové) parametry

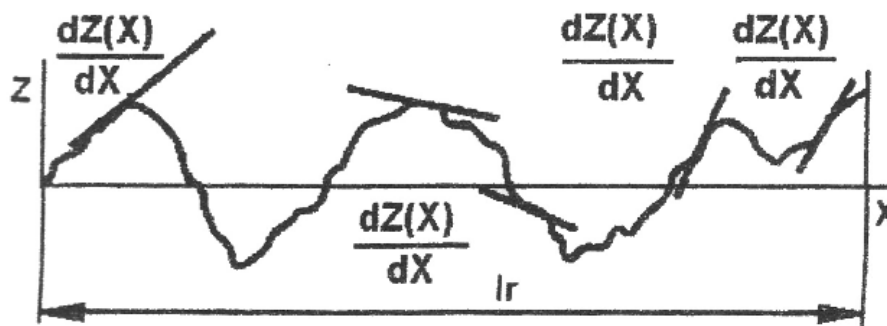
- **Průměrná vzdálenost prvků profilu RSm** - průměrná hodnota šířek Xs prvků profilu v rozsahu základní délky l_r (obr.19). Vztah je uveden v rovnici 6. Vyhodnocení vyžaduje zadání hladiny řezu C_1 a C_2 . [8]

Obr.19 Parametr RSm [8]

$$RSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (6) \quad [17]$$

5.1.3 Tvarové parametry

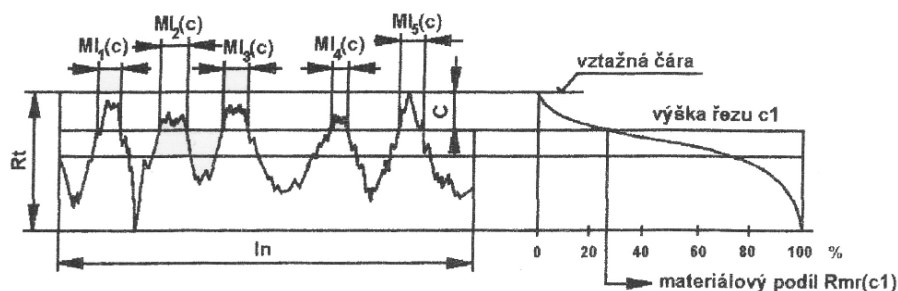
- **Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu $R\Delta q$** - průměrná kvadratická hodnota sklonu pořadnic dZ/dX v rozsahu základní délky l_r (obr.20). Vztah pro výpočet udává rovnice 7. Parametr $R\Delta q$ má význam při hodnocení tribologických vlastností, odrazu světla, galvanickém pokovování.[8,9]



Obr.20 Parametr $R\Delta q$ [8]

$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} \left(\frac{dZ}{dx} \right)^2 dx} \quad (7) \quad [17]$$

- **Materiálový podíl profilu (nosný podíl) $Rmr(c)$** - procentuální podíl délky materiálu prvků profilu $MI(c)$ na dané úrovni c k vyhodnocované délce l_n (obr.21). Rovnice 8 udává vztah pro výpočet. [8]



Obr.21 Parametr $Rmr(c)$ [8]

$$Rmr(c) = \frac{100}{l_n \sum_{i=1}^m MI_i(c)} = \frac{MI(c)}{l_n[\%]} \quad (8) \quad [17]$$

5.2 Měření 2D drsnosti

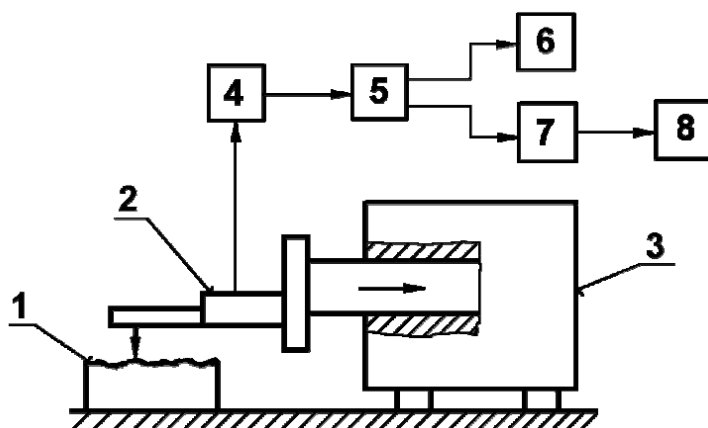
Od roku 1930, ve kterém byly vyvinuty přístroje pro měření topografie povrchu, byl zaznamenán významný pokrok jak v metodách, tak i v měřících zařízeních. Výrazným pokrokem bylo uplatnění digitálních metod v 60.tých letech, díky kterým se zvýšila přesnost měření a později daly možnost měřit jak v 2D tak i ve 3D. Metody pro měření drsnosti se dají rozdělit na mechanické a optické metody. Mezi nepoužívanější přístroje pro měření drsnosti jsou stále mechanická měřidla tzv. dotykové profilometry. Těmi lze převádět analogový signál na digitální a naměřené hodnoty se dají použít jako vztažné a srovnávací hodnoty pro jiné metody měření. V dnešní době firmy požadují rychlou kontrolu kvality, nejlépe přímo v automatizovaném výrobním procesu, a k tomu jsou nejvhodnější optické metody. Jedná se o nedestruktivní a bezdotykové měření, které nepřímě kopíruje povrch vzorku světelným paprskem. [11, 12]

V následujících kapitolách budou vysvětleny a popsány jednotlivé mechanické a optické metody měření drsnosti povrchu.

5.2.1 Měření pomocí dotykového profilometru

Tato metoda zjišťování drsnosti je velmi rozšířena zejména ve strojírenské praxi. Metoda umožňuje zjišťování číselných hodnot jednotlivých parametrů drsnosti a lze ji využít pro nejmodernější statistická a spektrální hodnocení nerovností povrchů. Elektrické měřící přístroje jsou vybaveny analogovými zesilovači měřených hodnot nebo mikropočítači, které z nasnímaného profilu okamžitě vyhodnotí žádané parametry drsnosti povrchu. [8, 11]

Dotykový profilometr se skládá z mechanické a elektronické části. Princip a popis profilometru vyobrazuje schéma na obr.22. Do mechanické části patří stolek, na který se umísťuje měřená součást, rameno se snímacím hrotem a posuv je zajištěn elektromotorkem popř. pneumaticky. Elektronická část se skládá z převodníku, který transformuje mechanický signál generovaný snímacím hrotem na elektrický signál. Tyto převodníky pracují na principu piezoelektrickém, magnetoelektrickém, indukčním nebo interferometrickém s využitím laseru. [8]



Obr.22 Schéma dotykového profilometru

1-měřený povrch, 2-snímací hlavice s hrotem, 3-posuvný mechanismus, 4-zesilovač, 5-filtr, 6-registrační jednotka, 7-jednotka zpracování signálu, 8-zobrazovací jed. [8]

Pohyb snímacího hrotu musí být velmi přesný co do přímosti tak i rovnoběžnosti. Rychlost musí být volena s ohledem na dynamické vlastnosti snímacího systému (nepoškození povrchu, věrné snímání nerovností). Správnost výsledků měření ovlivňuje [8]:

- poloměr zaoblení snímacího hrotu ($2\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$)
- vrcholový úhel snímacího hrotu (60° , 90°)
- měřicí přítláčná síla (cca $0,00075\text{ N}$)
- rychlost změny měřicí síly
- celkové geometrické uspořádání systému snímače

Jako každá metoda má své výhody a nevýhody. Mezi výhody u dotykového profilometru patří např. velká rozlišovací schopnost, přímé měření parametrů topografie povrchu, hrot překonává zbytky materiálu a olejový film, možnost kalibrace výsledků z nepřímých metod vzhledem k přímému měření atd. Nevýhody jsou např. destrukce povrchů u měkčích materiálů, pomalý pohyb hrotu po zkoušeném povrchu, nemožnost dálkového řízení, pouze 2D měření atd. [11,12]

5.2.2 Kontrola porovnání s etalony drsnosti

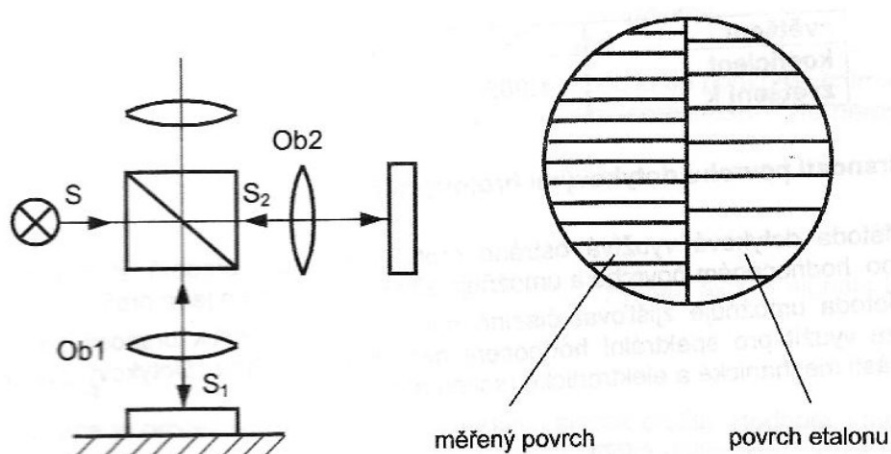
Tato metoda je založena na porovnávání drsnosti povrchu součástí s drsností etalonu buď pouhým okem nebo pomocí mikroskopu, popř. optického komparátoru.

Jako etalony slouží porovnávací vzorky (obr.23) obráběcích procesů (soustružení, frézování, hoblování, broušení, apod.), které jsou různě obrobeny na jmenovité řady drsnosti povrchu. Při měření je nutno dodržet určité podmínky, mezi které patří např. že materiál etalonu a měřené součásti by měl být stejný (alespoň co se barvy týče, měl by být stejný tvar povrchu etalonu a součásti (vypuklý, vydutý, plochý), musí být oba povrchy získány stejnou technologií obrábění a pozorovány při stejných podmínkách (osvětlení). Přesnost této metody je velmi nízká. [8,11]



Obr.23 Porovnávací etalony drsnosti [11]

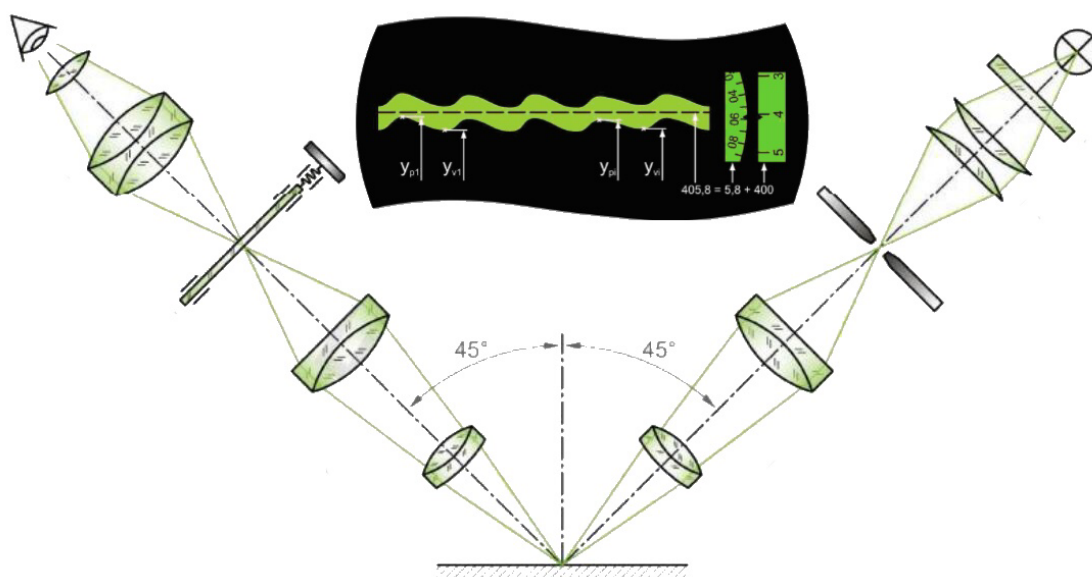
Pro zlepšení rozlišovací schopnosti oka se používají lupy a mikroskopy. Mikroskopy s vrchním osvětlením umožňují pozorovat povrchy ve světlém nebo tmavém poli. Rysky a vady na velmi hladkém povrchu se stanou zřetelné při mikroskopickém zobrazení ve tmavém zorném poli, které vznikne při šikmém osvětlení povrchu porušením totálního odrazu světla od kontrolované plochy. K tomu se využívá např. mikroskop CAMPAREX (obr.24)[11]



Obr.24 Princip mikroskopu Camparex[11]

5.2.3 Metoda světelného řezu

K měření touto metodou se nejčastěji používají dvojité mikroskopy. Základní schéma těchto mikroskopů je zobrazeno na obr. Na sloupu hmotnostního stojanu je výškově a otočně přestavitelné rameno s osvětlovacím a pozorovacím mikroskopem, jejichž osy spolu svírají úhel 90° . Ze zdroje světla v osvětlovacím mikroskopu procházejí paprsky světla filtrem a kondenzorem. Rovnoběžný svazek paprsků omezený štěrbinou do tvaru velmi tenké světelné roviny je promítán optickým systémem pod úhlem 45° na měřený povrch. Průnikem této roviny nerovnostmi povrchu vznikne obraz profilu šikmého řezu nerovnosti plochy, který má většinou tvar světlozelené stužky ve tmavém poli mikroskopického obrazu. Princip metody je na obr.25. Rozsah použití těchto mikroskopů je omezený. Metoda je limitována odrazivostí materiálu. [8,11]

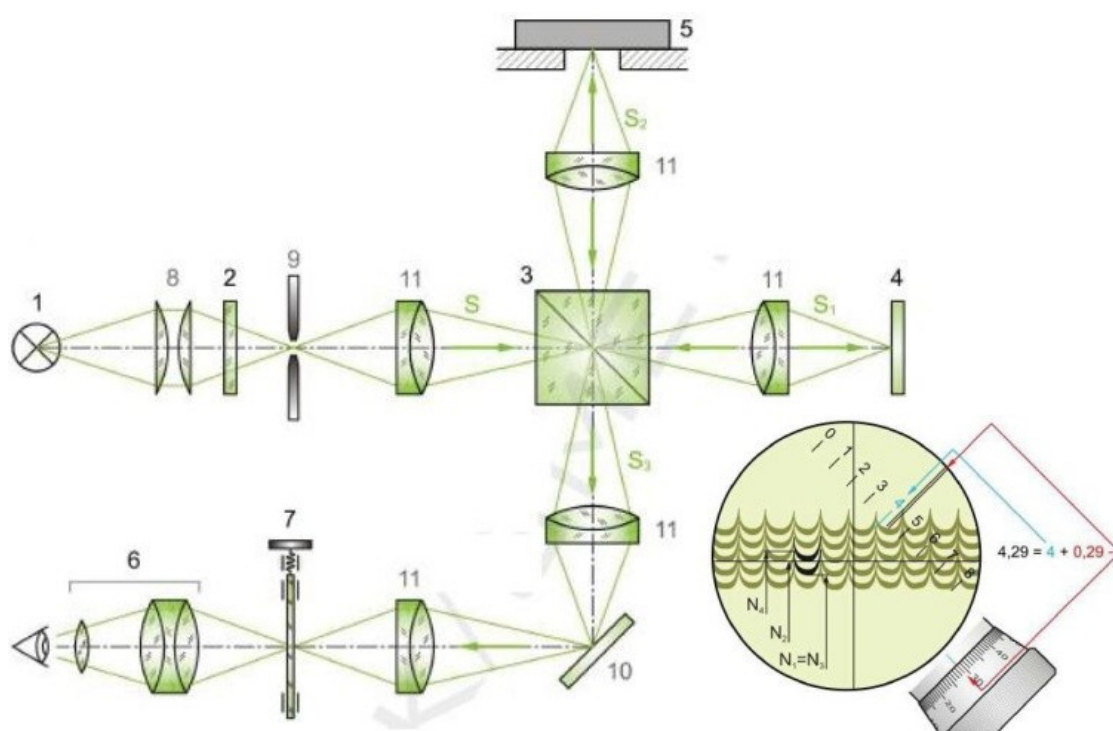


Obr.25 Schéma dvojitého mikroskopu pro měření pomocí světelného řezu [11]

5.2.4 Měření s využitím interference světla

Interferenční metoda se s výhodou používá pro měření drsnosti povrchu velmi jemně obrobených ploch (broušené, lapované, superfinišované plochy). Princip této metody spočívá ve skládání vln o stejné frekvenci a konstantním fázovým posuvem, tzv. koherentní vlnění, čím se dosáhne využití jednoho zdroje, když se světlo rozdělí a opět spojí. Interference se v okuláru jeví soubor světlých a tmavých křivek. [8]

Na obr.26 je zobrazeno schéma interferometru. Světelný paprsek S vycházející ze zdroje 1 prochází přes barevný filtr 2. Barevný filtr je optický hranol s dělicí rovinou 3, který rozděluje paprsek na dva paprsky. Paprsek S₁ je propuštěný na etylénové zrcadlo 4 a druhý paprsek S₂ je usměrněný na kontrolovaný povrch měřeného předmětu 5. Oba paprsky se po odrazu vracejí zpět do hranolu, kde se spojí (interferují) v jeden paprsek S₃ a ten je usměrněný do okuláru 6. Objektivy 11 zabezpečují správné zaostření a zvětšení pozorovaného interferenčního obrazu. K dalším částem interferometru patří destička s osovým křížem a stupnicí 7, kondenzor 8, clona 9 a zrcadlo 10. [8,11]



Obr.26 Optické schéma interferometru a pohled do okuláru

Při měření na interferometru se pro získání hodnoty vychýlení interferenčního pásu využívá okulár s mikrometrickou strukturou. V zorném poli se nachází pohyblivý nitkový kříž a pevná stupnice, která se vhodně nastavuje do polohy pro odečítání jednotlivých hodnot sloužících pro výpočet parametru drsnosti. Pohled do okuláru a způsob odečítání je vidět na obr.26.[11]

Jako u mechanických metod hodnocení drsnosti povrchu mají i optické metody své výhody a nevýhody. K výhodám patří bezkontaktnost a nedestruktivnost, rychlá

interpretace výsledků, schopnost kontinuální kontroly a řízení kvality povrchu, opakovatelnost měření, možnost měření z větší vzdálenosti a velká rychlost snímání. K nevýhodám patří složitější interpretace výsledků, nepřímé měření parametrů topografie povrchu, povrch musí být důkladně očištěn od mastnoty a zbytkových částic, záleží na odrazivosti materiálu apod.

5.3 Hodnocení 3D drsnosti

Po dlouhou dobu byla standardním způsobem měření textury povrchu dotyková metoda, při které byl zaznamenáván vertikální pohyb posunujícího se snímacího hrotu po povrchu. Zpravidla se měřila jedna stopa, což poskytovalo omezené informace pro kontrolu a zejména úpravy výrobního procesu. V uplynulých 20-ti letech se začal výrazně prosazovat požadavek na využití kontroly textury povrchu pro posuzování jeho funkčních vlastností. I když měření jednoho profilu povrchu může poskytnout některé dílčí informace k jeho funkci, je zřejmé, že komplexnější informace o funkci lze získat jen trojrozměrným, tedy prostorovým měřením profilu povrchu.[13]

V současné době se měřením 3D drsnosti neboli topografie zabývá několik světově významných firem. Mezi nejvíce známou a nejaktivnější firmu zabývající se 3D měřením povrchu patří firma TaylorHobson. Je vyvíjeno značné úsilí definovat soubor parametrů pro 3D hodnocení povrchů, ale i přesto doposud neexistuje mezinárodně uznaný standard. Pro prostorové hodnocení povrchu se v současné době připravují návrhy ISO standardů, které zahrnují terminologii, definice parametrů, kalibrační metody, charakteristiky měřicích přístrojů i metodiky měření. I když jsou přístroje pro prostorové měření drsnosti a vyhodnocení celé řady parametrů textury, je zřejmé, že praktické zvládnutí přechodu z hodnocení jednoho profilu na charakteristiku plochy povrchu představuje dlouhodobý proces. Výběr parametrů drsnosti povrchu zatím vychází z koncepce standardů 2D parametrů drsnosti, která je výsledkem řešení praktických problémů zejména ve strojírenské oblasti. Výhodou je, že trojrozměrné parametry hodnotí celý měřený povrch a dvourozměrné parametry hodnotí pouze měřicí linie na měřeném povrchu, což znamená, že 3D hodnoty jsou komplexnější a objektivnější než 2D. V následujících kapitolách budou popsány parametry 3D drsnosti a některé z metod měření topografie.[11,12,13]

5.4 Parametry 3D drsnosti

Jak již bylo řečeno parametry pro 3D hodnocení povrchu ještě nebyly přesně stanoveny normou. Některé parametry jsou odvozeny z 2D parametrů. Výrobce měřicí techniky TaylorHobson se soustřeďuje jak na výrobu přístrojů a tvorbu softwaru na měření textury a tvaru povrchu, tak je i současně zapojen do přípravy a normalizace metodik měření, zpracování výsledků a jejich vyhodnocení formou parametrů. V současné době tato firma nabízí software pro prostorové vyhodnocování textury povrchu Talymap, který využívá u svých měřících systémů. Program využívá pro prostorové hodnocení povrchu amplitudové parametry (většina je odvozena z parametru 2D), dále parametry popisující materiálový poměr povrchu (ISO 13565–2), parametry vztahované k rozmístění nerovností (např. hustota výstupku, rozvinutý povrch, apod.) a konečně objemové parametry (zavedené ke kvantifikaci nosného podílu a poměru objemu materiál / dutiny). V programu je obsaženo 120 parametrů 2D měření a 40 parametrů pro 3D měření. [14]

Mezi tyto parametry patří podle literatury [14] např.:

5.4.1 Amplitudové parametry

Představují skupinu parametru prostorového hodnocení, která vychází z rozložení výšek souřadnic profilu povrchu. Parametry jsou většinou odvozeny z parametru 2D dle ISO 4287. Patří zde:

- ***Průměrná aritmetická úchylka povrchu S_a***
- ***Průměrná kvadratická úchylka (RMS) povrchu S_q***
- ***Celková výška povrchu S_t***
- ***Maximální výška výstupku S_p***
- ***Maximální hloubka prohlubní S_v***
- ***Výška z deseti bodu povrchu S_z***
- ***Šikmost křivky rozdělení výšek S_{sk}***
- ***Špičatost křivky rozdělení výšek S_{ku}***

5.4.2 Plošné a objemové parametry

- **Nosný poměr v dané hloubce Smr** - Tento parametr musí být určován s mezní hodnotou a referenčním údajem. Např. $3\mu m$ pod nejvyšším výstupkem, $1\mu m$ nad středem, $1\mu m$ nad hranicí určenou 20% Tp .
- **Výškový rozdíl řezu povrchem Sdc** - Výška oddělující dva nosné poměry. Tento parametr musí být určován dvěmi mezními hodnotami zadávanými v %.
- **Střední hodnota poměru nezaplňného objemu $Smvr$** - Představuje celkový objem nezaplňného povrchu, který se získá měřením prostoru mezi body povrchu a imaginární horizontální rovinou proloženou v největší výšce profilu povrchu.
- **Střední hodnota poměru materiálového objemu $Smmr$** - Představuje celkový objem materiálu povrchu, který se získá měřením prostoru mezi imaginární horizontální rovinou proloženou v největší hloubce profilu povrchu a body povrchu.

5.4.3 Prostorové parametry

- **Počet výstupku na ploše SPc** - Hustota výstupku mezi dvěma úrovněmi $c1$ a $c2$. Rozšíření 2D parametru Pc . $c1$ a $c2$ jsou mezní úrovně (roviny) definované ve vztahu ke střední rovině 0. $C1$ musí být nižší než $c2$. Výstupek se bere v úvahu jen tehdy, když překročí $c2$ a přejde pod $c1$. Parametr je vyjádřen počtem výstupku na mm^2 .
- **Hustota výstupku povrchu Sds** - Parametr je vyjádřen počtem výstupku na mm . Za výstupek je považován bod, který je vyšší než 8 sousedních bodů.
- **Délka odpovídající nejrychlejšímu poklesu autokorelační funkce Sal** - Délka nejrychlejšího poklesu na 0,2 autokorelační funkce. Parametr vyjadřuje množství vlnových délek profilu povrchu. Vysoké hodnoty ukazují na obsahující především vysoké vlnové délky (tj. nízké frekvence).
- **Poměrný aspekt textury povrchu Str** - Poměr nejkratší délky poklesu na 0,2 autokorelační funkce k největší délce. Parametr se pohybuje v rozmezí 0 až 1. Je-li hodnota blízká 1 lze povrch označit za isotropní, tzn. má ve všech směrech stejnou charakteristiku. Blíží-li se hodnota 0 je povrch anizotropní, tzn. s orientovanou a/nebo periodickou texturou povrchu.

- **Směr textury povrchu Std** - Stanovuje hlavní úhel směru textury povrchu. Parametr má význam je-li hodnota menší než 0,5. Úhel směru se vyjadřuje ve stupních od -90° do 90° . Jestliže má povrch kruhovou texturu (soustružený, řezaný) potom parametr udává chybný směr blízký tangentě kružnice. – V případě, že povrch má dva nebo více hlavních směru textury, Std udává úhel směru rozhodujícího z nich.
- **Fraktální dimenze povrchu Sfd** - Parametr ukazuje tvarovou složitost profilu povrchu s využití teorie fraktální geometrie. Dimenze povrchu se pohybuje mezi hodnotami 2 (rovinná plocha) a 3 (velmi složitý tvar povrchu). U některých tvaru povrchu nelze fraktální dimenzi stanovit a parametr pro hodnocení využít.

5.4.4 Hybridní parametry

Charakterizují spojení amplitudových a prostorových kritérií jako jsou sklony, zakřivení, atd.

- **Kvadratický sklon povrchu Sdq**
- **Aritmetický průměr zakřivení výstupku povrchu Ssc**
- **Poměrná rozvinutá styková plocha Sdr**

5.4.5 Funkční parametry

Také nazývané parametry nosného podílu. Jsou skupinou parametru charakterizující funkční aspekty povrchu, především mazání a broušení. Jsou speciálně určeny kontrole v automobilním průmyslu.

- **Hloubka jádra drsnosti Sk** (hloubka drsnosti jádra)- Rozšířený 2D parametr Rk
- **Redukovaná výška výstupku Spk** (výška výstupku drsnosti) -Rozšířený 2D parametr Rpk
- **Redukovaná hloubka prohlubní Svk** (hloubka drsnosti prohlubní) -Rozšířený 2D parametr Rvk
- **Horní materiálový poměr Sr1** - Rozšířený 2D parametr MR1
- **Dolní materiálový poměr Sr2** - Rozšířený 2D parametr MR2
- **Horní plocha Sa1** (plocha trojúhelníku odpovídající výstupkům) - Rozšířený 2D parametr

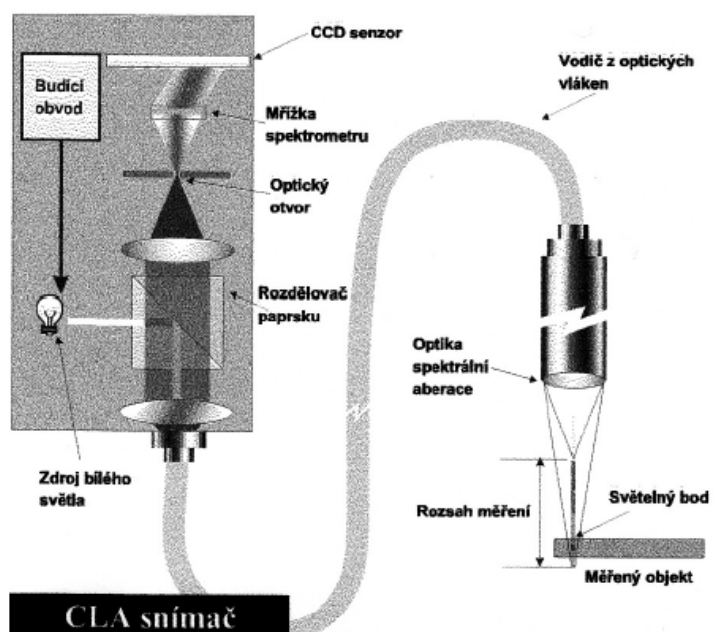
- **Dolní plocha Sa2** (plocha trojúhelníku odpovídající prohlubním) - Rozšířený 2D parametr

5.5 Měření 3D drsnosti

K měření a hodnocení topografie povrchu se využívají především bezdotykové optické metody. Mezi tyto metody patří např. měření optickým profilometrem a měření laserovým snímačem. Tyto metody budou dále popsány.

5.5.1 Měření optickým profilometrem

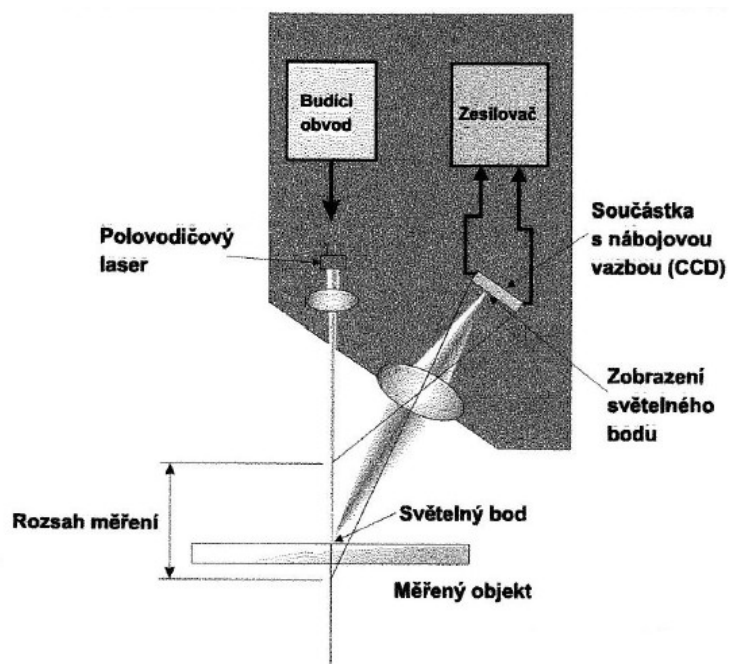
Bílé světlo je ze zdroje optickým vláknem přivedeno ke spojné čočce. Po dopadu na měřený povrch vzorku je fokusované světlo optimálně odraženo zpět do čočky a optickým vláknem přivedeno na clonou. Dopadá na mřížku spektrometru a tato mřížka vychýlí světlo na CCD senzor, kde je vyhodnocená maximální amplituda odráženého spektra odpovídající Z-souřadnici snímaného bodu povrchu. Princip je zobrazen na obr.27. [11]



Obr.27 Schéma CLA snímače [11]

5.5.2 Měření pomocí laserového snímače

Paprsek polovodičového laseru se odráží od vyhodnocovaného povrchu do čočky v optickém systému, kde je zaostřen na povrch CCD snímače. Poloha dopadajícího paprsku odpovídá Z-souřadnici snímaného bodu. Princip této metody je zobrazen na obr.28. [11]



Obr.28 Schéma měření pomocí laserového snímače [11]

6 Experimentální část

V této části se budu zabývat zkoumáním různých vlastností a parametrů protlačovaného materiálu EN AW 6060. Patří zde zkoumání mikrostruktury materiálu a změny tvrdosti HV po jednotlivých protlačeních. Nejdůležitější částí bude měření topografie povrchu vzniklého hydroabrazivním dělením při určitých parametrech řezání v závislosti na počtu protlačení daných vzorků, neboli na změně jejich mikrostruktury a mechanických vlastností. Dílčí výsledky řešení diplomové práce budou využity v projektu GAČR 101-09-0650 „Metoda odvození ekvivalentů mechanických parametrů materiálů z topografie povrchů vytvořených hydroabrazivním proudem“.

6.1 Zkoumaný materiál

Jako výchozí materiál byla použita duralová tyč EN AW 6060 o průměru 10 mm. Jedná se o konstrukční materiál s dobrou tvárností, svařitelností, lešitelností a odolností proti korozi. Často se používá v automobilovém a leteckém průmyslu, stavebnictví, potravinářství nebo pro jemnou mechaniku (např. části měřících zařízení). Chemické složení, ekvivalenty značení a mechanické vlastnosti tohoto materiálu jsou uvedeny v tabulce 2, 3 a 4.

Tab.2 Chemické složení materiálu EN AW 6060

EN AW 6060									
Chemické složení	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Al
Min.	0	0	0,1	0,35	0	0,3	0	0	Zbytek
Max.	0,05	0,1	0,3	0,6	0,1	0,6	0,1	0,15	

Tab.3 Ekvivalenty značení dle různých norem

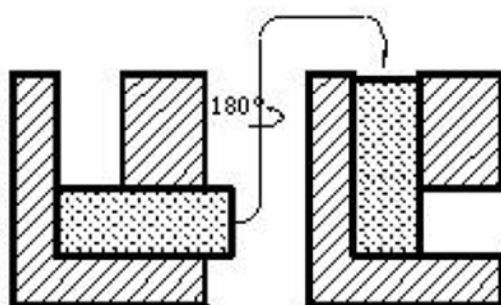
EN	ISO	ČSN	STN	DIN
EN AW-6060	AlMgSi0,5	ČSN 42 4401	STN 42 4401	3.3206

Tab.4 Tabulkové hodnoty mechanických vlastností materiálu EN AW 6060

Mez pevnosti Rm [Mpa]	Mez kluzu Rp(0,2) [Mpa]	Tažnost A 50mm [%]	Tvrdost HB	Svařitelnost	Obrobitelnost
195	150	6	65	velmi dobrá	velmi dobrá






6.2 Příprava vzorků technologií ECAP

Vzorky byly protlačovány na hydraulickém lisu s maximální zatěžovací silou 1 MN na pracovišti TU Košice na Katedře tváření kovů. Maximální možná délka vzorků byla 90 mm, průřez vzorku byl kruhový o rozměru 10 mm. Jednotlivé vzorky byly protlačeny 1 až 4 průchody postupem C, kde se otočí vzorek o 180° po každém protlačení jak je uvedeno na obr. 29. Úhel mezi kanály použité ECAP zápustky byl 90°. V tabulce 5 jsou znázorněny vzorky po jednotlivých etapách protlačení.



Obr.29 Schéma průchodu postupem C

Tab.5 Vzorky po jednotlivých průchodech

0	
1	
2	
3	
4	

6.3 Příprava vzorků technologií AWJ

Vzorky vytvořené technologií ECAP byly rozřezány technologií abrazivního vodního paprsku na Ústavu geoniky AV ČR v Ostravě. Tato technologie byla použita z důvodů, že při řezání nedochází k tepelnému ovlivnění materiálu (studený řez) a na vytvořeném povrchu lze sledovat topografii, kterou ovlivňuje velikost zrna.

Jako čerpadlo bylo použito vysokotlaké čerpadlo PTV-37-60 Pump (obr.30), které má dvojčinný multiplikátor, maximální pracovní tlak 415 MPa, maximální průtočné množství $3,68 \text{ l.min}^{-1}$ a elektrický příkon 37 kW.



Obr.30 Vysokotlaké čerpadlo PTV-37-60 Pump

V tabulce 6 jsou uvedeny vstupní hodnoty použité technologie AWJ, při kterých se prováděla výroba vzorků. Všechny parametry při výrobě byly konstantní, měnila se pouze posuvová rychlost řezné hlavy od 100 do 300 mm.min^{-1} . Na obr.31 jsou zobrazeny nařezané části, které vznikly rozřezáním jednoho z protlačených vzorků.

Tab.6 Vstupní hodnoty použité technologie AWJ

Technologické faktory	Značka	Jednotka	Hodnota
Tlak kapaliny	P	MPa	370
Průměr trysky	d_o	mm	0,3
Průměr usměrňovací trubice	d_a	mm	0,8
Délka usměrňovací trubice	l_a	mm	76
Hmotnostní průtok abraziva	m_a	$\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$	265
Vzdálenost trysky od povrchu	L	mm	2
Rychlost posuvu	v_p	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	100, 150, 200, 250, 300
Velikost abraziva	-	MESH	80
Materiál abraziva	-	-	Granát Barton

**Obr.31** Vzorky vzniklé hydroabrazivním dělením

6.4 Metalografické výbrusy

Metalografické výbrusy byly provedeny za účelem porovnání velikosti zrna po jednotlivých průchodech při protlačování pomocí ECAP. Vzorky byly nejprve broušeny na brusce KOMPAKT 1031 (obr.32) a byl použit brusný papír zrnitosti 600, 1200 a 2000 MESH. Následně byly leštěny 20s na přístroji Struers LectroPol-5 (obr.33) při napětí 24V v elektrolytu pod firemním označením D2 a nakonec leptány po dobu 4s při napětí 2V ve stejném elektrolytu.



Obr.32 Bruska KOMPAKT 1031



Obr.33 Přístroj Struers LectroPol-5

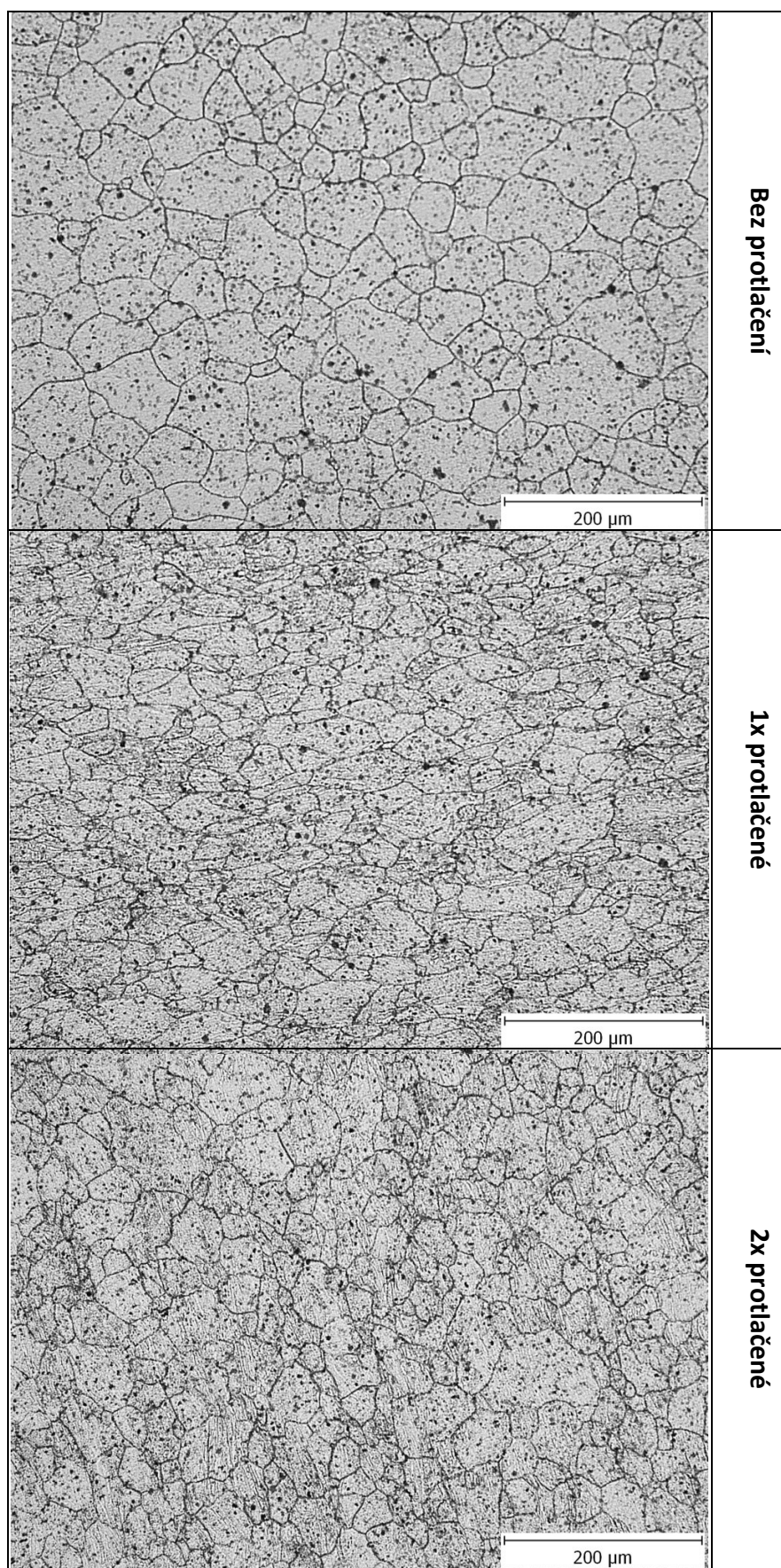
Vytvořené vzorky (obr.34) byly pozorovány na mikroskopu GX51 (obr.35) s maximální zvětšením 1000x. V následující tabulce (tab.7) jsou znázorněny metalografické výbrusy od výchozího neprotlačeného materiálu až po materiál, který byl protlačen 4x, kde lze pozorovat kvalitativní změny struktury materiálu.

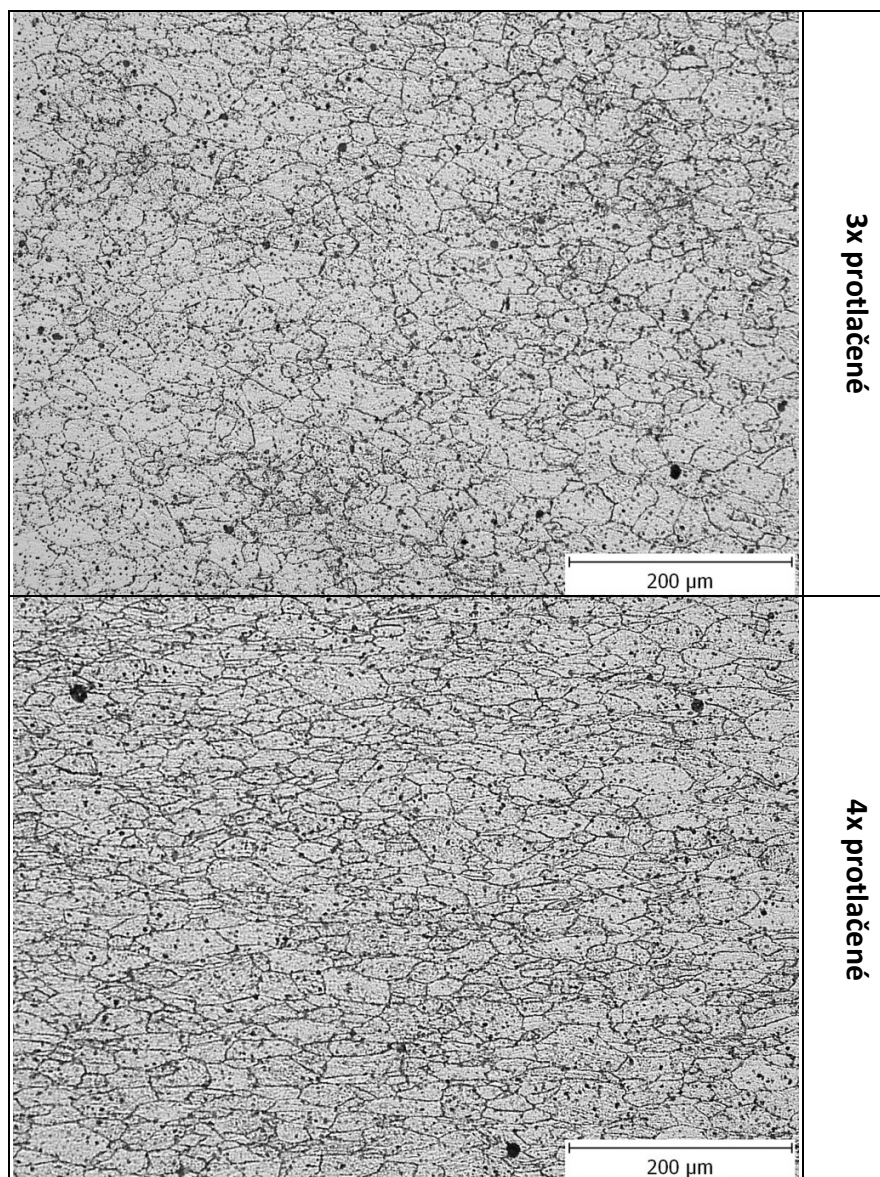


Obr.34 Vytvořené vzorky pro metalografické výbrusy



Obr.35 Mikroskop GX51

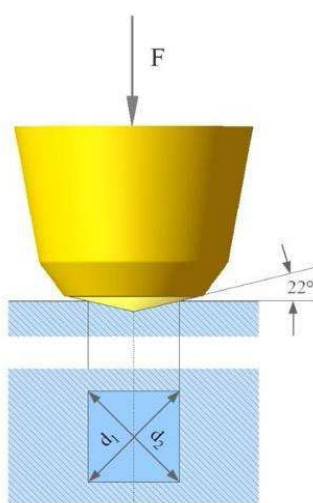
Tab.7 Metalografické snímky po jednotlivých protlačeních



Na výchozím materiálu bez protlačení lze pozorovat homogenní strukturu bez zjevné anizotropie. Po prvním protlačení došlo k největší změně mikrostruktury, struktura je nehomogenní a ukazuje se silná anizotropie ve směru protlačování. Každým dalším protlačením lze pozorovat postupné zjemňování zrna a změny homogenity a anizotropie.

6.5 Měření tvrdosti

U všech vzorků byla měřena tvrdost podle Vickerse HV0,3, za účelem zjištění rozdílů mezi počtem protlačení a tvrdostí. Vickersova zkouška je značně univerzální, lze ji použít na měkké i tvrdé materiály. Mezi výhody patří, že výsledná hodnota tvrdosti nezávisí na zatěžovací síle, protože vtisky jsou pro různé síly geometricky přibližně stejné. Princip měření tvrdosti (obr.36) spočívá ve vnikání zkušebního tělesa, neboli indentoru do zkoumaného materiálu a následné zjišťování velikosti vzniklé deformace. Jako indentor se používá diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° a měřítkem tvrdosti jsou délky dvou úhlopříček vtisknutého jehlanu.[16]

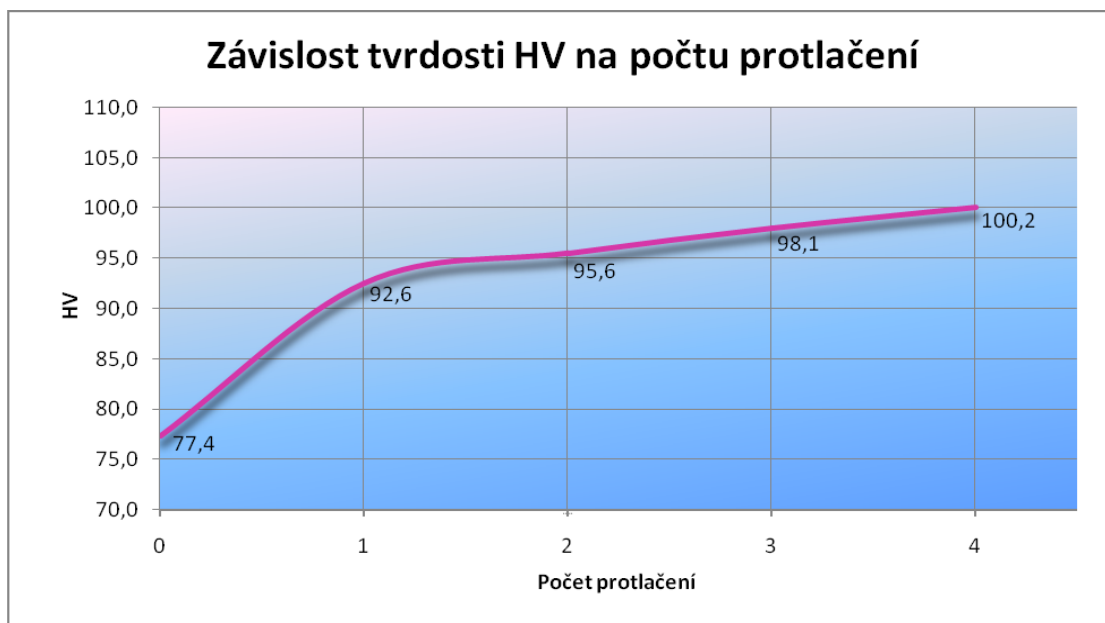


Obr.36 Princip měření tvrdosti podle Vickerse[16]

Tvrdost byla měřena na stěně kolmé na směr protlačování a na každém ze vzorků bylo provedeno 5 měření. Z naměřených hodnot se vypočítal aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Tyto hodnoty zachycuje tab.8. Průměrné hodnoty jsou pro přehlednější interpretaci graficky znázorněny na obr.37.

Tab.8 Naměřené hodnoty tvrdosti HV

Protlačení	Měření [HV]					Arit. průměr \bar{x}	Sm. odchylka $s(x)$
	1	2	3	4	5		
0	81,3	78,8	76,8	74,9	75	77,4	2,22
1	92,4	94,2	90,5	95,9	90	92,6	2,03
2	91,7	99	93,6	95,3	98,3	95,6	2,52
3	97,8	97,3	101,2	99,2	94,9	98,1	1,91
4	102,7	99,9	99	98,8	100,4	100,2	1,28

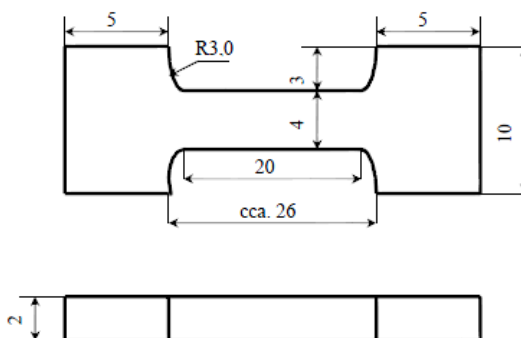


Obr.37 Závislost tvrdosti HV na počtu protlačení

Z grafu je patrné, že po každém protlačení ECAP roste tvrdost materiálu. Největší nárůst tvrdosti je vidět po prvním protlačení, kdy tvrdost stoupne přibližně o 15HV. U každého dalšího protlačení už tvrdost stoupá poměrně pomaleji.

6.6 Tahová zkouška

K získání dalších mechanických vlastností byly vzorky podrobeny tahovým zkouškám v laboratořích a zkušebnách VÚHŽ a.s., kde bylo požadováno stanovení meze kluzu $R_{p0,2}$, meze pevnosti R_m , tažnosti A , síly při přetržení F_b , Youngův modul pružnosti E a Poissonovo číslo μ . Z dodaných vzorků s kruhovým průřezem byly navrženy modifikované zkušební tyče s nenormovanými rozměry. Na obr.38 je uveden náčrtek zkušební tyče. Pro každou hodnocenou skupinu vzorků byly vyrobeny 2 kusy zkušebních těles.

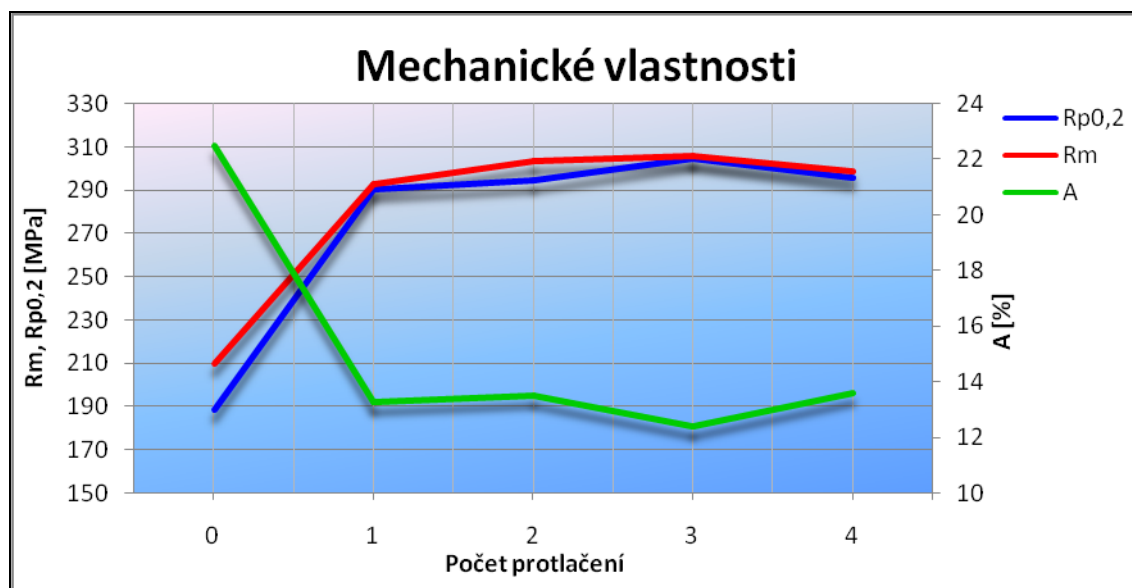


Obr.38 Náčrtek zkušební tyče pro tahovou zkoušku

Z laboratoře byly stanoveny výsledky mechanických vlastností. Ty jsou uvedeny jako průměrné hodnoty mechanických veličin stanovených ze dvou zkoušek pro jednotlivou skupinu vzorků. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tab.9 a na obr.39 je graficky znázorněna závislost R_m , $R_{p0,2}$ a A na počtech protlačení ECAP. Poissonovo číslo se vzhledem k omezené přesnosti snímání deformace při použití nenormovaných vzorků považuje v tomto případě spíše za informativní.

Tab.9 Naměřené hodnoty mechanických vlastností po jednotlivých protlačeních

Počet protlačení	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A [%]	Modul pružnosti E [GPa]	Poissonovo číslo μ	Síla při dolomení F_b [N]
0	189	210	22,5	48	0,4	888
1	291	293	13,3	62	0,35	1509
2	295	304	13,5	78	0,3	1296
3	305	306	12,4	85	0,3	1630
4	296	299	13,6	85	0,3	1316



Obr.39 Závislost R_m , $R_{p0,2}$ a A na počtu protlačení

Stejně jako u měření tvrdosti výrazně stoupl R_m a $R_{p0,2}$ po prvním protlačení a dále se zvětšovaly poměrně málo. U čtvrtého protlačení dokonce pevnost nepatrně klesla. Parametr tažnosti A naopak s rostoucím počtem protlačení klesá, to znamená, že se snižuje tvařitelnost materiálu. Na základě těchto zkoušek se jako nejvýhodnější zpracování jeví 2 a 3 protlačení.

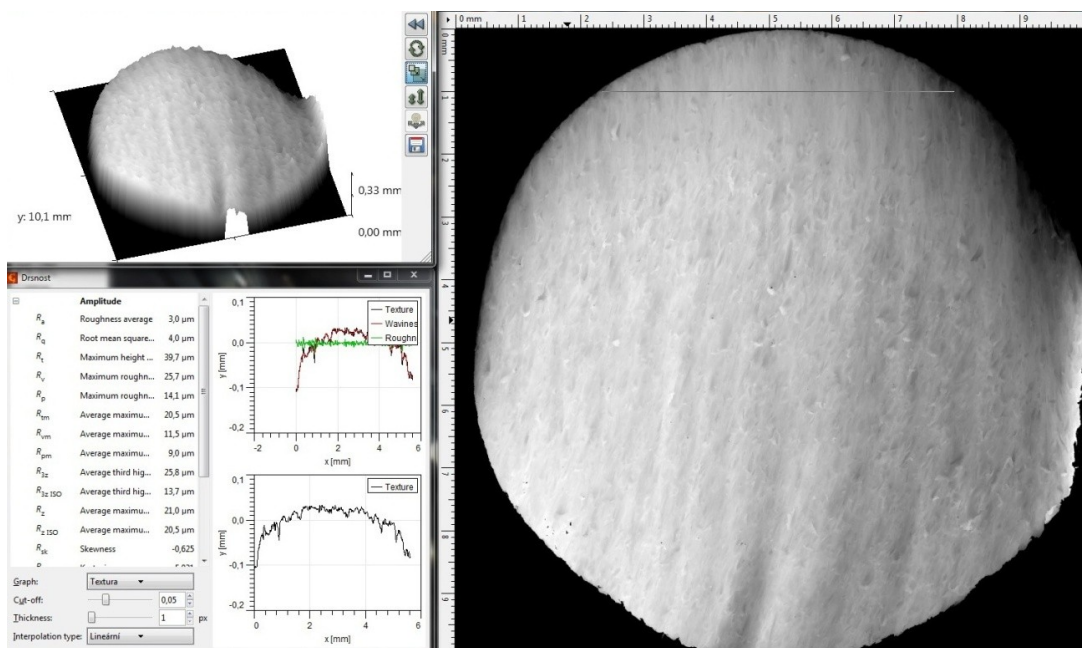
6.7 Měření topografie povrchu

Vytvořené vzorky byly měřeny na ústavu geoniky AV ČR v Ostravě optickým profilometrem MicroProf od firmy FRT, který je zobrazen na obr.40.



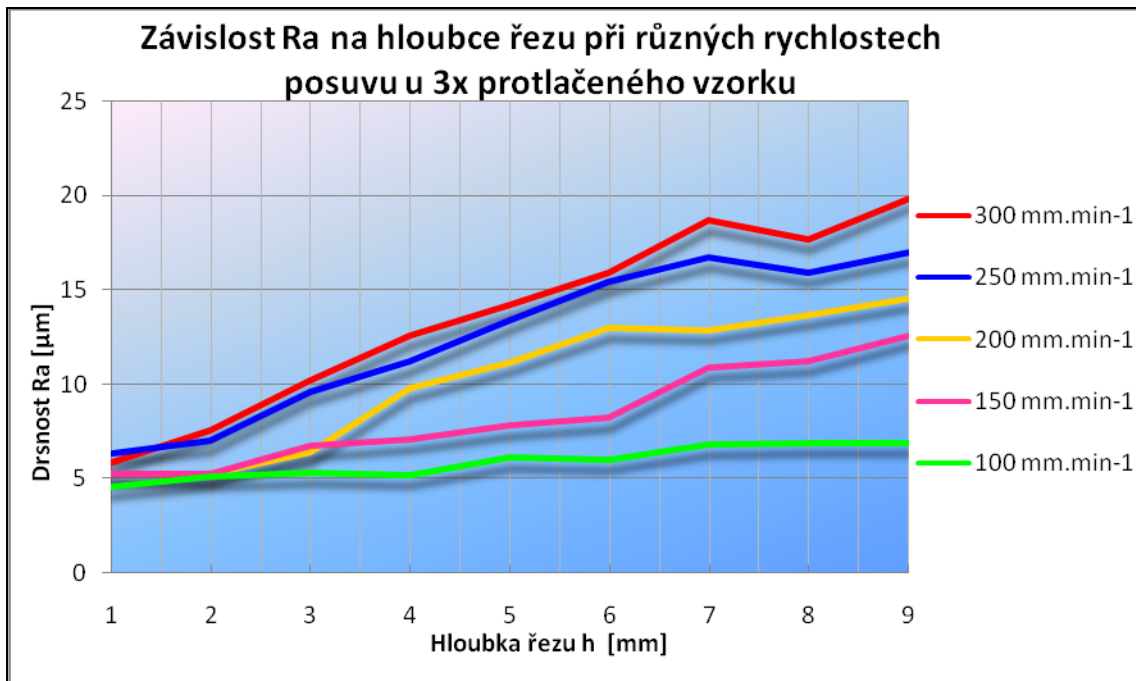
Obr.40 Optický profilometr MicroProf firmy FRT

Každý vzorek byl změřen v 9 liniích kolmých ke směru vodního paprsku s roztečí 1 mm. Z každé linie byly získány hodnoty drsnosti R_a a R_z , které byly dále vyhodnocovány. Tyto parametry byly získány softwarem Gwyddion 2.10. Příklad vyhodnocení je zobrazen na obr.41, kde vlevo nahoře vidíme 3D topografii nasnímaného povrchu, vlevo dole normované hodnoty parametrů drsnosti pro danou linii a vpravo 2D texturu nasnímaného povrchu.

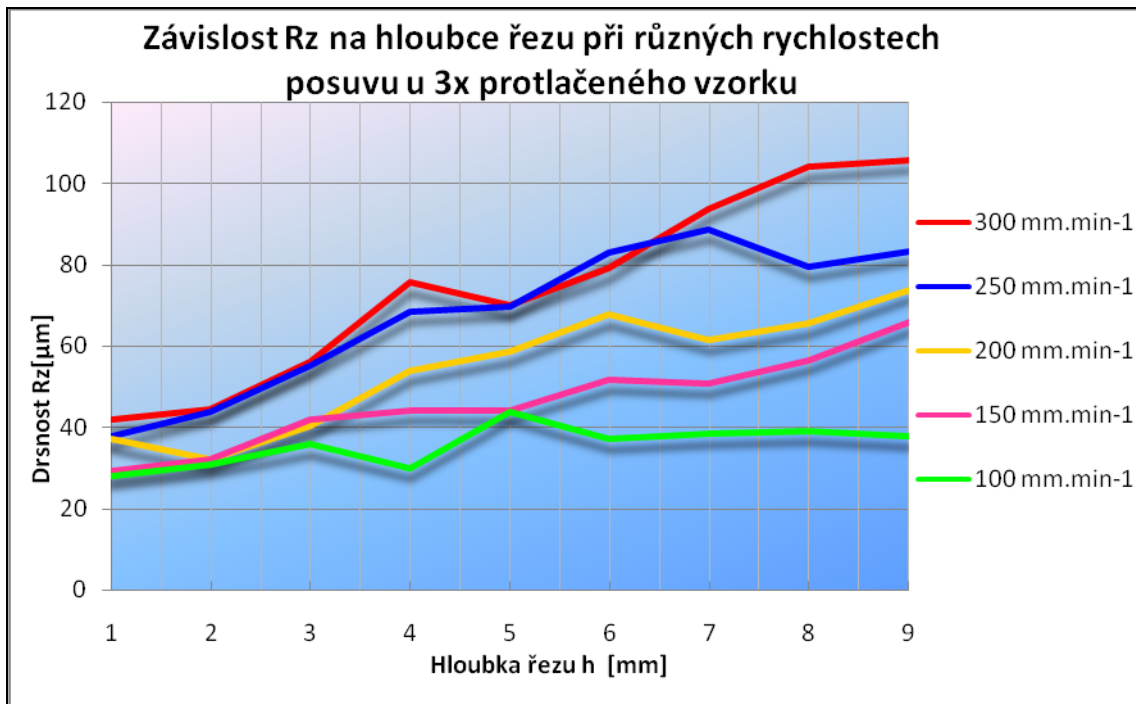


Obr.41 Příklad vyhodnocení parametrů drsnosti softwarem Gwyddion 2.10

Z naměřených hodnot, které jsou tabulkově zobrazeny v příloze 1, byly pro ukázkou a přehlednější interpretaci výsledků a různých závislostí vytvořeny grafy. Na obr. 42 a 43 jsou vidět závislosti drsnosti R_a a R_z na hloubce řezu h při měnící se rychlosti posuvu řezné hlavy pro materiál protlačovaný 3x zápustkou ECAP.

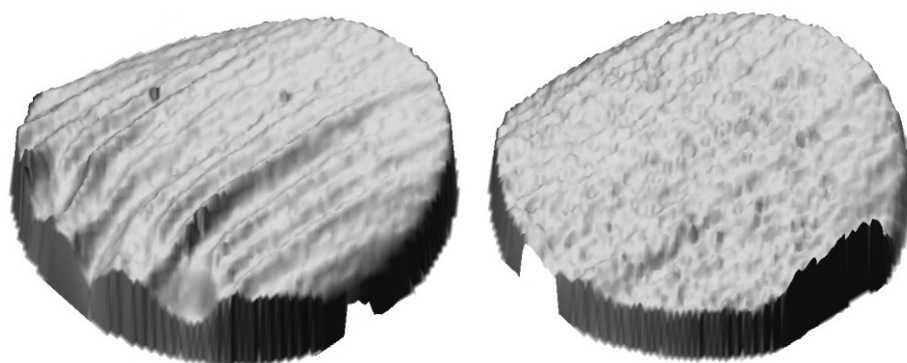


Obr.42 Závislost R_a na hloubce řezu při různých rychlostech posuvu řezné hlavy



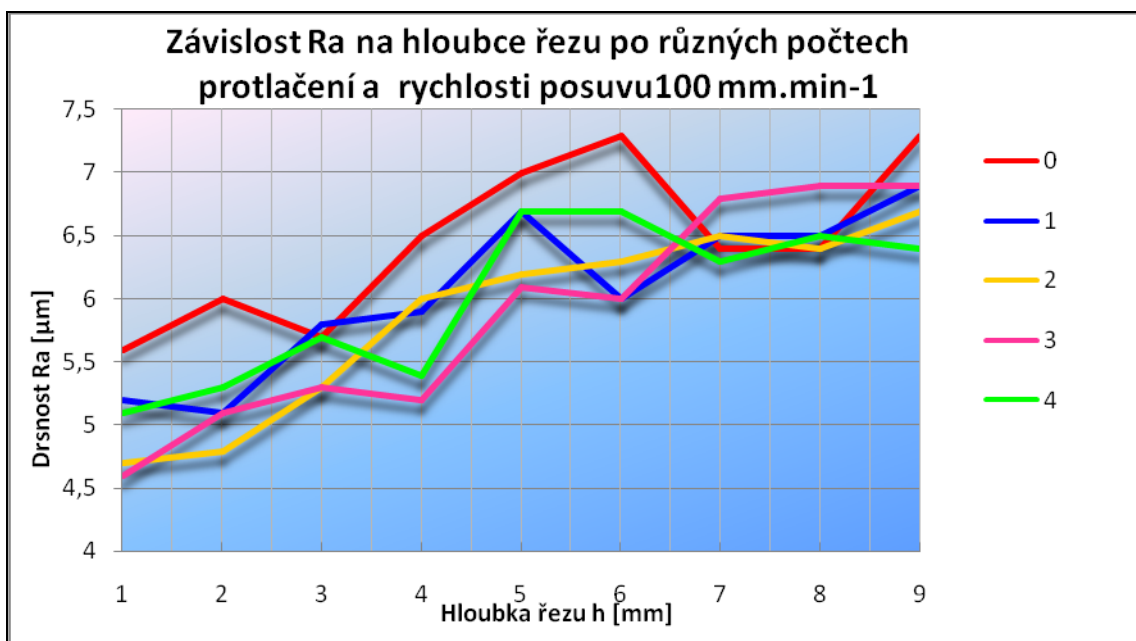
Obr.43 Závislost R_z na hloubce řezu při různých rychlostech posuvu řezné hlavy

Z grafů je vidět výrazný vliv rychlosti posuvu na výslednou topografii povrchu. S rostoucí posuvovou rychlostí a hloubkou řezu hodnoty R_a a R_z stoupají. To je způsobeno tím, že vodní paprsek vystupující z trysky má určitou počáteční kinetickou energii a při kontaktu s materiálem tuto energii pomalu ztrácí a vychyluje se. Tento jev je dobře vidět na obr.44, kde je nalevo zobrazena topografie povrchu řezu při posuvu $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a napravo topografie při posuvu $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Tyto obrázky byly opět vytvořeny softwarem Gwyddion a jedná se o vzorek 2x protlačený metodou ECAP.

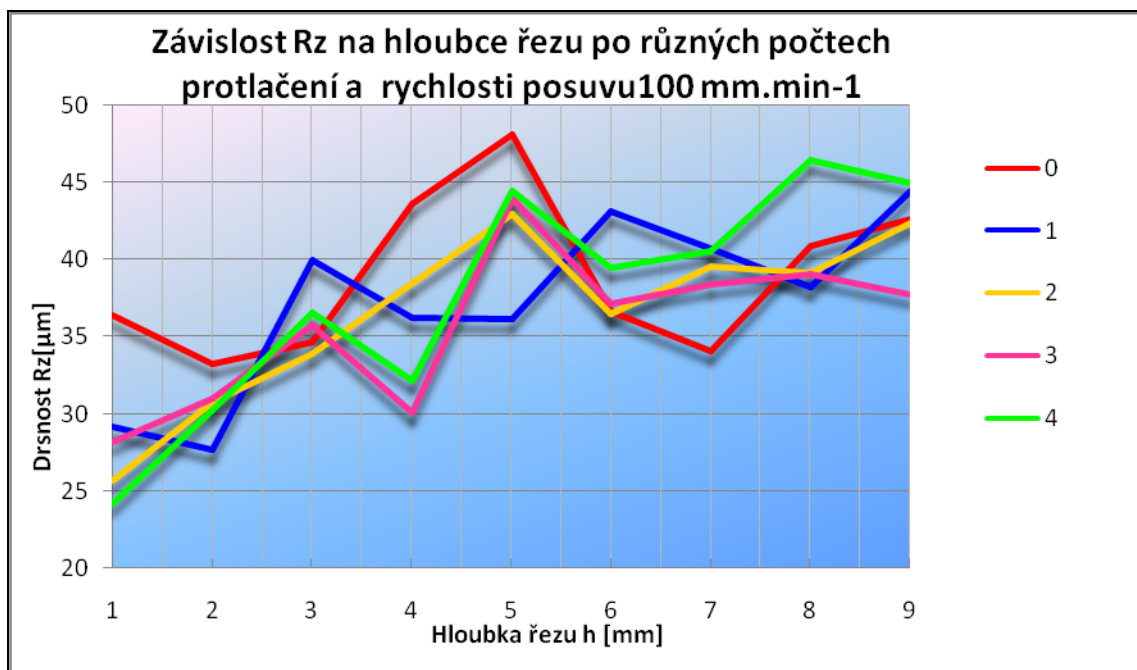


Obr.44 Rozdíly v topografii povrchu při rychlosti posuvu $300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

Dále byly graficky znázorněny závislosti drsností R_a a R_z na hloubce řezu po jednotlivých protlačeních při konstantní posuvové rychlosti $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Tyto závislosti jsou zobrazeny na obr. 45 a 46.



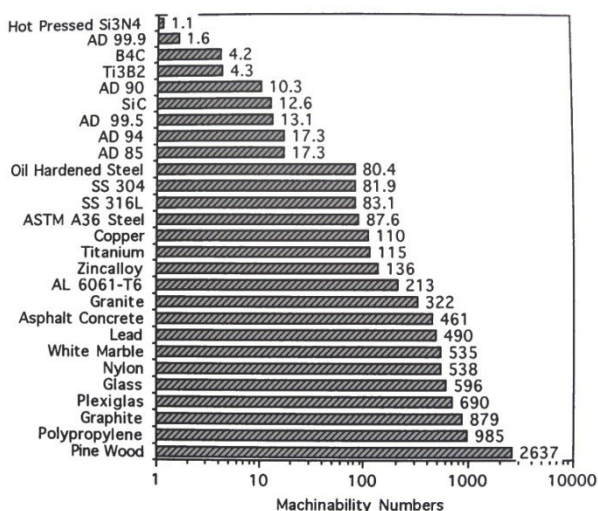
Obr.45 Závislost R_a na hloubce řezu po různých počtech protlačení



Obr.46 Závislost Rz na hloubce řezu po různých počtech protlačení

Předpokládal jsem, že zmenšující se velikosti zrna bude mít vliv na výslednou topografii povrchu řezu. Z těchto grafů je patrné, že vliv velikosti zrna po jednotlivých průchodech ECAP, se nijak výrazně neprojevil. To je zřejmě způsobeno tím, že zkoumané vzorky mají příliš malé rozměry.

Co se týká vlivu změny mechanických vlastností na výslednou topografii řezné plochy, tak ta by podle lit. 19 neměla mít velký vliv. Z obr. 47 lze vidět, že obrobitelnost záleží spíše na druhu materiálu než na jeho mechanických vlastnostech. Např. u různých druhů ocelí se index obrobitelnosti liší nepatrně.



Obr.47 Indexy obrobitelnosti pro obrábění hydroabrazivním paprskem [19]

7 Závěr

První část teoretické části je věnována popisu zkoumaného materiálu (dural) včetně popisu jeho vlastností, rozdělení, použití, apod. Následující část se zabývá výrobou jemnozrnných materiálů pomocí technologie úhlového kanálového protlačování ECAP. Touto metodou byly vytvořeny vzorky posuzované v experimentální části. V další kapitole je rozbor nekonvenční technologie obrábění vodním paprskem, která byla použita k dělení získaných vzorků. V poslední kapitole je popsána problematika hodnocení 2D a 3D drsnosti povrchu a uvedeny principy a parametry s tím související.

Cílem této diplomové práce bylo posuzování topografie povrchu vytvořeného hydroabrazivním dělením protlačovaného materiálu a posuzování různých vlivů (počet protlačení, velikost zrna, rychlost posuvu řezací hlavy, změna mechanických vlastností, atd.) na výslednou topografii. Dále se měly vyhodnotit změny mechanických vlastností a mikrostruktura po jednotlivých protlačeních metodou ECAP.

Jako výchozí materiál byla použita duralová tyč EN AW 6060 o průměru 10 mm. Metodou ECAP byly protlačeny 4 vzorky, z nichž každý byl vystaven jinému počtu protlačení. Jednotlivé vzorky byly hydroabrazivním paprskem rozděleny na 5 částí za měnícího se posuvu řezné hlavy. Ostatní parametry řezání byly konstantní. Tyto vzorky spolu s dalšími byly dále zkoumány.

Po vytvoření metalografických výbrusů, se potvrdil předpoklad, že s rostoucím počtem protlačení se velikost zrna zmenšuje. Na výchozím materiálu bez protlačení byla homogenní struktura bez zjevné anizotropie. Po jednom průchodu došlo k největší změně mikrostruktury, struktura byla nehomogenní a vykazovala silné anizotropie ve směru protlačování. Každým dalším protlačením docházelo k postupnému zjemňování zrna a ke změnám homogenity a anizotropie. Ke zjemnění zrna na velikost pod $1\mu\text{m}$ však při čtyřech protlačeních nedošlo.

Se změnou mikrostruktury se mění i mechanické vlastnosti. Pro posouzení změny tvrdosti v závislosti na počtu protlačení bylo vybráno měření tvrdosti podle Vickerse. Z původní tvrdosti 77,4 HV_{0,3} vzrostla tvrdost po čtvrtém protlačením přibližně na 100 HV_{0,3}. To znamená zvýšení tvrdosti přibližně o 30%.

Stejně jako tvrdost výrazně stouply i další mechanické vlastnosti jako R_m a $R_{p0,2}$. R_m vzrostlo z původní hodnoty 209MPa na 306MPa, což činí nárůst přibližně 45%. Parametr $R_{p0,2}$ se zvýšil z původních 189 MPa na 305MPa, což je nárůst o 61%. Na základě těchto zkoušek se jako nejvýhodnější zpracování jevílo druhé a třetí protlačení. U čtvrtého protlačení došlo k malému poklesu R_m a $R_{p0,2}$. Parametr tažnosti A naopak s rostoucím počtem protlačení klesal, to znamená, že s počtem protlačení klesala tvařitelnost materiálu.

Pro posouzení topografie povrchu vytvořeného hydroabrazivním dělením byl použit optický profilometr MicroProf od firmy FRT a výsledky byly zpracovány pomocí softwaru Gwyddion. Každý vzorek byl měřen v 9-ti liniích kolmo na směr proudu hydroabrazivního parsku. Z naměřených hodnot byl vidět výrazný vliv rychlosti posuvu na výslednou topografii povrchu. S rostoucí posuvovou rychlostí a hloubkou řezu hodnoty R_a a R_z stoupaly. To je způsobeno tím, že vodní paprsek vystupující z trysky má určitou počáteční kinetickou energii a při kontaktu s materiálem tuto energii pomalu ztrácí a vychyluje se. Dále bylo zjišťováno, zda zmenšující se velikosti zrna má vliv na výslednou topografii povrchu řezu. Z naměřených hodnot a vykreslení grafů bylo patrné, že vliv velikosti zrna po jednotlivých průchodech ECAP, se nijak výrazně neprojevil. To mohlo být způsobeno tím, že zkoumané vzorky měly příliš malé rozměry.

Dílí výsledky řešení diplomové práce budou využity v projektu GAČR 101-09-0650 „Metoda odvození ekvivalentů mechanických parametrů materiálů z topografie povrchů vytvořených hydroabrazivním proudem“.

Seznam použité literatury

- [1] JANOVEC, J. - CEJP, J. - STEIDL, J. *Perspektivní materiály*. Praha: ČVUTPraha, 2008. 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [2] Technický týdeník [online]. [cit.2011-02-23] Dostupný z [www: <http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=1892&mark=>](http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=1892&mark=>)
- [3] PTÁČEK, L. a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické vydavatelství CERM s.r.o., 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [4] RUSZ, S. - GREGER, M. - KUBÍČEK, M. - PASTRNÁK, M. - SENDERSKI, J. *Vývoj nanostrukturních materiálů s využitím technologie ECAP*. [online]. [cit. 2011-02-15]. Dostupný z [www: <http://www.nanocon.cz/data/metal2004/sbornik/papers/14.pdf>](http://www.nanocon.cz/data/metal2004/sbornik/papers/14.pdf).
- [5] RUSZ, S. *Moderní metody ve tváření (sylaby)* [online]. [cit.2011-02-15]. Dostupný z [www: <http://www.345.vsb.cz/KE%20vyuka/Rusz/Moderni_metody_ve_tvareni_sylaby.pdf>](http://www.345.vsb.cz/KE%20vyuka/Rusz/Moderni_metody_ve_tvareni_sylaby.pdf).
- [6] RUSZ, S. - MALANÍK, K. - BOŘUTA, J. *Zefektivnění procesu vícenásobné plastické deformace*. [online]. [cit.2011-02-15]. Dostupný z [www: <http://www.nanotechnologie.cz/storage/Rusz.pdf>](http://www.nanotechnologie.cz/storage/Rusz.pdf).
- [7] PODJUKLOVÁ, J. *Speciální technologie povrchových úprav I*. Učební texty, VŠB-TU, Ostrava, 1994, 71 s. ISBN 80-7078-235-8.
- [8] TICHÁ, Š.: *Strojírenská metrologie část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004. 112 s. ISBN 80-248-0672
- [9] NESLUŠAN, M. – TUREK, S. – BRYCHTA, J. – ČEP, R. – TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilinská univerzita v Žilině, EDIS vydavateľstvo ŽU, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8
- [10] ČSN EN ISO 4287 – *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda*. Termíny, definice a parametry struktury povrchu, Praha, ČNI, 1999.
- [11] MACHÁČ, J. *Hodnocení drsnosti povrchu 2D a 3D metodou*. Ostrava 2010, Bakalářská práce na VŠB-TU Ostrava, Katedra obrábění a montáže. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

- [12] HALUZÍKOVÁ, B. *Měření a analýza topografie povrchů plastových produktů ve vztahu k technologii výroby*. Ostrava 2010, Diplomová práce na VŠB-TU Ostrava, Katedra obrábění a montáže. Vedoucí diplomové práce doc.Ing.Jan Valíček, Ph.D.
- [13] MM Průmyslové spektrum [online]. [cit.2011-03-15]. Dostupný z [www: <http://mmspektrum.com/clanek/prostorova-charakteristika-textury-povrchu>](http://mmspektrum.com/clanek/prostorova-charakteristika-textury-povrchu)
- [14] NOVÁK, Z. *Prostorové měření a hodnocení textury povrchu přístroji Taylor Hobson Ltd.* [online]. [cit.2011-03-17] Dostupný z [www: <http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2_Novak_3D_mereni_textury.pdf>](http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2_Novak_3D_mereni_textury.pdf)
- [15] SADÍLEK, M. *Nekonvenční metody obrábění*. VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009. 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8
- [16] HLAVÁČEK, P. *Měření textury povrchů vytvořených hydroabrazivním dělením jemnozrnných materiálů*. Ostrava 2010, Diplomová práce na VŠB-TU Ostrava, Katedra obrábění a montáže. Vedoucí diplomové práce doc.Ing.Jan Valíček, Ph.D.
- [17] Plakát. *Drsnost povrchu a úchyly tvaru a polohy dle DIN ISO* [online]. Teplice : HOMMEL CS s.r.o., 2011 [cit. 2011-03-13]. Dostupné z WWW: [<http://www.hommel-etamic.cz/cz/pdf/HOMMEL%20CS%20plakat.pdf>](http://www.hommel-etamic.cz/cz/pdf/HOMMEL%20CS%20plakat.pdf).
- [18] FRT. [online]. [cit.2011-03-20]. Dostupný z [www: <http://www.frt-gmbh.com/en/products/microprof/microprof/>](http://www.frt-gmbh.com/en/products/microprof/microprof/)
- [19] ZENG, J. - KIM, T. J. *Parameter prediction and cost analysis in abrasive waterjet cutting operations*. University of Rhode Island, Kingston, U.S.A. 1993.

Seznam příloh

Příloha 1: Naměřené hodnoty drsností Ra a Rz všech měřených vzorků

PODĚKOVÁNÍ

Na závěr této práce bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Robertu Čepovi, Ph.D., konzultantce práce Ing. Lence Čepové, Ph.D., doc. Ing. Janu Valíčkovi, Ph.D., Ing. Petru Hlaváčkovi a Ing. Michalovi Zeleňákovi za odborné rady, připomínky a pomoc při zpracování této diplomové práce.